

**Untersuchungen zur Reflexion von
Waldbäumen mit unterschiedlichen
Schadsymptomen auf der Grundlage
von Labor- und Geländemessungen**

Barbara Koch

Disbui. München

1988

Untersuchungen zur Reflexion von
Waldbäumen mit unterschiedlichen
Schadsymptomen auf der Grundlage
von Labor- und Geländemessungen

Inaugural-Dissertation
zur Erlangung der Doktorwürde
der Forstwissenschaftlichen Fakultät
der Ludwig-Maximilians-Universität
München

vorgelegt von Barbara Koch

München im Dezember 1987

Gutachter: Prof. Dr. U. Ammer
Prof. Dr. H. Mayer
Prof. Dr. F. Jaskolla

Tag der mündlichen Prüfung: 22.02.1988

Vorwort

Mein besonderer Dank gilt Herrn Prof. Dr. U. Ammer für die Themenstellung, die großzügige Förderung und die Durchsicht der Arbeit.

Herrn Prof. Dr. D. Ernst, Herrn Dr. Dr. habil. F. Jaskolla und Herrn Dr. Dr. habil. H. Mayer danke ich für ihre stete Diskussionsbereitschaft und Beratung während der Durchführung meiner Arbeit.

Für die Unterstützung bei den experimentellen Untersuchungen und der Datenaufbereitung möchte ich mich bei Frau Dipl. Geol. S. Krause-Rabe, Herrn Dipl. Geol. T. Schneider und Herrn Dipl. Geol. H. Wittmeier bedanken.

Herrn Dr. M. Leischner und seiner Frau Susanne bin ich für die Unterstützung bei den Programmierungsarbeiten zu Dank verpflichtet.

Frau G. Dietrich, Frau Ch. Kuchenreiter und Frau E. Greska führten gewissenhaft die umfangreichen Schreibarbeiten aus.

Danken möchte ich auch Herrn Kern und Herrn Seuffert für ihre beratende und unterstützende Tätigkeit bei der Ausführung der Graphiken, sowie allen anderen Mitarbeitern des Lehrstuhls und meiner Familie die mir durch ihre Kooperation und ihr Verständnis ein erfolgreiches Arbeiten ermöglichten.

Außerdem danke ich Herrn Dr. Payer und seinen Mitarbeitern von der GSF die uns den Raum und das Pflanzenmaterial für die Laboruntersuchungen zur Verfügung stellten.

Dem Lehrstuhl für Bodenkunde und dem Lehrstuhl für Bioklimatologie und Angewandte Meteorologie sei für die Bereitstellung ihrer Versuchsflächen und die gute Zusammenarbeit gedankt.

Nicht zuletzt ist dem Bundesministerium für Forschung und Technologie für die finanzielle Unterstützung des Forschungsvorhabens zu danken.

Inhalt	Seite
Vorwort	I
Inhalt	II
1. Einführung	1
2. Physikalische Grundlagen der elektromagnetischen Strahlung	3
2.1 Elektromagnetische Strahlung	3
2.1.1 Wechselwirkungen zwischen elektromagnetischer Strahlung und Materie	4
2.1.2 Das elektromagnetische Spektrum	7
2.2 Physikalische Grundlagen der Reflexion	9
2.2.1 Reflexionsgeometrie	9
2.2.2 Reflexionsgrad	13
3. Stand der Wissenschaft zur Reflexion von Pflanzen	15
3.1 Laboruntersuchungen zur Reflexion von Blattorganen	15
3.1.1 Einflußfaktoren auf die Reflexion von Blättern	17
3.1.1.1 Pigmentation	18
3.1.1.2 Beschaffenheit der Blattoberfläche	20
3.1.1.3 Zellstruktur	20
3.1.1.4 Wassergehalt	26
3.1.2 Reflexionsmessungen an Pflanzen mit Schwermetallbelastung und unterschiedlicher Nährstoffversorgung	28

	Seite
3.2 Feldspektroskopie	30
3.2.1 Einflußparameter des natürlichen Lebensraums	30
3.2.1.1 Einstrahlungs- und Beobachtungsgeometrie	31
3.2.1.2 Atmosphäre	32
3.2.1.3 Wetter	34
3.2.1.4 Belaubungsdichte	35
3.2.2 Einflußparameter der Meßsystemanordnung	38
3.2.2.1 Beobachtungsrichtung	38
3.2.2.2 Referenzwerterfassung	41
3.2.3 Einflußparameter des Meßsystems	42
 4. Material und Methode	 43
4.1 Technische Ausstattung	43
4.1.1 Gerätekonfiguration	43
4.1.1.1 Spektroradiometer	46
4.1.1.1.1 Spektralkanäle des Spektroradiometers	47
4.1.1.1.2 Optik des Spektroradiometers	48
4.1.1.1.3 Elektronik des Spektroradiometers	50
4.1.1.1.4 Kalibrierung des Spektroradiometers und der Filter	50
4.1.1.2 Meßsystemanordnung zur Referenzwertmessung	52
4.1.1.3 Eigene Tests zur Erprobung des Spektroradiometers	55
4.1.1.3.1 Reproduzierbarkeit der Meßwerte	55
4.1.1.3.2 Lage und Größe der Meßausschnitte	56
4.1.1.3.3 Einfluß des Öffnungswinkels auf die Meßwerte	58
4.1.1.3.4 Einfluß von Luftfeuchtigkeit und -temperatur auf die Meßwerte	61
4.2 Rahmenbedingungen zur Durchführung der Messungen im Gelände	 63
4.2.1 Abhängigkeit der Reflexion von Einstrahlungswinkel und Beobachtungswinkel	63
4.2.2 Wind	69
4.2.3 Bewölkung	69
4.2.4 Meßsystemanordnung im Gelände	71

4.3	Rahmenbedingungen zur Durchführung der Messungen im Labor	72
4.4	Datenauswertung	75
4.4.1	Aufbereitung der Daten	75
4.4.2	Normierung der Reflexionskurven	76
4.4.3	Mittelwertkurven	80
4.4.4	Bildung der Minima und Maxima	80
4.4.5	Bildung der Quotienten	81
4.5	Beschreibung der Testflächen	82
4.5.1	Ebersberger Forst	82
4.5.2	Höglwald	84
4.5.2.1	Altbestand im Höglwald	84
4.5.2.2	Jungbestand im Höglwald	86
4.5.2.3	Buche im Höglwald	88
4.5.3	Untere Isarauen	89
4.6	Beschreibung der Versuche	91
4.6.1	Untersuchungen zur Kronenreflexion bei Blatt- bzw. Nadelverlust	91
4.6.2	Untersuchungen zur Reflexion der Waldbäume im Jahresrhythmus	95
4.6.3	Untersuchungen zur Reflexion bei Blatt- und Nadel- vergilbungen	96
4.6.4	Untersuchungen zur Reflexion bei Trockenstreß	98
4.6.5	Untersuchungen zur Reflexion des Baum- bzw. Nadelalters	103
5.	Darstellung der Ergebnisse	104
5.1	Veränderung der Reflexion durch Blatt- bzw. Nadelverlust	104
5.1.1	Labormessungen zum Blatt- bzw. Nadelverlust	105
5.1.2	Geländemessungen zum Blatt- bzw. Nadelverlust	110

5.2	Reflexion von Fichte und Buche im Jahresrhythmus	120
5.2.1	Labormessungen zum Jahresgang der Reflexion von Fichten	120
5.2.2	Geländemessungen zum Jahresgang der Reflexion von Fichten und Buchen	123
5.2.2.1	Messungen zum Jahresgang der Reflexion von Fichten bei gleicher Tageszeit	123
5.2.2.2	Messungen zum Jahresgang der Reflexion von Fichten bei gleichem Sonnenzenitwinkel	127
5.2.2.3	Messungen zum Jahresgang der Reflexion bei Buche	131
5.3	Veränderung der Reflexion durch Blatt- bzw. Nadelvergilbung	134
5.3.1	Labormessungen zur Blatt- bzw. Nadelvergilbung	134
5.3.2	Geländemessungen zur Blatt- bzw. Nadelvergilbung	141
5.4	Veränderung der Reflexion durch Trockenstreß	146
5.4.1	Labormessungen zum Trockenstreß	146
5.4.1.1	Labormessungen an Fichtenbäumchen zum Trockenstreß	146
5.4.1.2	Labormessungen zum Trockenstreß an Fichtennadeln und -zweigen	150
5.4.2	Geländemessungen zum Trockenstreß	153
5.5	Reflexionsmessungen an unterschiedlich alten Bäumen bzw. Blattoorganen	156
5.5.1	Labormessungen zur Reflexion unterschiedlich alter Fichtennadeln und gleichaltriger Fichtennadeln von unterschiedlich alten Bäumen	157
5.5.2	Geländemessungen zur Kronenreflexion unterschiedlich alter Bäume	161
6.	Diskussion	164

7.	Zusammenfassung	175
	Literaturverzeichnis	179
	Verzeichnis der Abbildungen	186
	Verzeichnis der Tabellen	192
	Verzeichnis der verwendeten Symbole	194
	Anhang	

1. EINFÜHRUNG UND ZIELSETZUNG

Mit der fortschreitenden Zerstörung der Umwelt in Europa gewinnen Meßsysteme, die frühzeitig präzise Informationen über Art, Ausmaß und Ort von Umweltveränderungen liefern, zunehmend an Bedeutung (HILDEBRANDT 1983, GALLI DI PARATESI 1986).

Mit Hilfe der Fernerkundung können solche Daten relativ kostengünstig und kontinuierlich zur Verfügung gestellt werden. Es kommen daher - unterstützt durch die rasch fortschreitende Scannertechnologie und ihre Anpassung an europäische Anforderungen - Fernerkundungssysteme zur Erdbeobachtung immer häufiger zum Einsatz. Allein zwischen 1980 bis 1990 wird die Europäische Gemeinschaft 3,8 Mrd. DM für Erdbeobachtungssatelliten bereitgestellt haben (FRAYSSE 1984).

Die zunehmend verbesserte räumliche und spektrale Auflösung der Satellitendaten hat auch in Land- und Forstwirtschaft bereits zur Einbeziehung digitaler Fernerkundungsdaten bei der Bearbeitung spezifischer Aufgaben geführt (ESA-Bericht 1987). Ein Schwerpunkt in der Erprobung moderner Fernerkundungsdaten lag dabei in der BRD bisher im Bereich der Waldschadensforschung. So haben Untersuchungen von KRITIKOS et al. (1983) sowie AMMER, KOCH und KRITIKOS (1985) zur Eignung von Flugzeugscanner- bzw. Satellitendaten für die Schadenserfassung bei Fichte befriedigende Ergebnisse erbracht.

Dabei wurde allerdings auch deutlich, daß für eine umfassende Nutzung digitaler Scannerdaten noch zu wenig über die Reflexionscharakteristiken von einzelnen Waldbäumen bzw. von Waldbeständen bekannt ist. Zur Verbesserung der Aussagegenauigkeit bei der Interpretation von Scannerbilddaten sind deshalb ausführliche Untersuchungen zur Bestimmung der baumspezifischen Reflexion in Abhängigkeit von äußeren Einflußparametern erforderlich. Da die für detaillierte Signaturanalysen benötigte Meßgenauigkeit und -kontinuität nicht allein durch die in ihrer räumlichen und spektralen Auflösung begrenzten Flugzeugscanner- oder Satellitendaten erreicht werden kann (AMMER 1983), müssen für Reflexionsuntersuchungen zusätzlich Feld- und Labormessungen mit hochauflösenden Meßinstrumenten einbezogen werden. Dabei lassen die im Labor unter definierten Bedingungen durchgeführten Reflexionsmessungen an Pflanzenteilen differenzierte Kenntnisse über die Blattreflexion erwarten, während anhand von in situ Messungen das Reflexionsverhalten eines Waldbestandes mit ausreichender Genauigkeit im natürlichen Jahres- und Tagesrhythmus nachvollzogen werden kann (MURTHA 1978).

Die überwiegende Anzahl der bisher durchgeführten spektralen Signaturuntersuchungen wurde an Blattorganen im Labor durchgeführt; Reflexionsmessungen über Waldbäumen auf der Grundlage von Feldspektroradiometermessungen sind kaum vorhanden. Die wenigen vorliegenden Ergebnisse aus eintägigen oder mehrtägigen Meßkampagnen beziehen dynamische Entwicklungsprozesse, wie sie im Verlauf der Vegetationsperiode auftreten, nicht mit ein. Die Beschränkung der Feldmeßkampagnen auf meist wenige Tage ist vorwiegend auf die erschwerenden, mit hohem personellen und technischen Aufwand verbundenen Arbeitsbedingungen im Gelände zurückzuführen.

Die vorliegende Arbeit hat sich deshalb zum Ziel gesetzt, **die für die Interpretation digitaler Fernerkundungsdaten wichtigen Kenntnisse zur Reflexion von geschädigten und gesunden Waldbäumen in ihrem natürlichen Jahresrhythmus zu erfassen**. Neben methodischen Fragen zur Meßsystemanordnung, Gerätetauglichkeit und Erfassung bzw. Aufbereitung der Meßdaten, lag der Schwerpunkt der Untersuchungen auf der Abschätzung des qualitativen Einflusses

- der Jahreszeit
- der Vitalität und
- des Alters.

Dabei wurden **erstmalig die genannten Einflußvariablen parallel im Labor und im Gelände** untersucht, um über den anschließenden Vergleich der Meßergebnisse eine Abschätzung vornehmen zu können, inwieweit die über den Baumkronen gemessene Reflexion durch pflanzenspezifische bzw. pflanzenunabhängige Parameter beeinflusst wird.

2. PHYSIKALISCHE GRUNDLAGEN ZUR ELEKTROMAGNETISCHEN STRAHLUNG

Bevor auf die konkrete, der Arbeit zugrunde liegende Methodik eingegangen wird, sollen kurz die physikalischen Grundlagen der elektromagnetischen Strahlung dargestellt werden. Dabei wird ein besonderer Schwerpunkt auf die für das Verständnis der Arbeit wichtigen Gesetzmäßigkeiten der Reflexion gelegt.

2.1 Elektromagnetische Strahlung

Unter elektromagnetischer Strahlung versteht man jede Form von Energie, die sich mit Lichtgeschwindigkeit in gleichmäßigen Wellenbewegungen fortsetzt. Die von der elektromagnetischen Strahlung mitgeführten Energiepakete werden als Photonen bzw. Lichtquanten bezeichnet. Durch die Wechselwirkung der Photonen mit lichtempfindlichen Detektoren kann deren Energie in elektrische Signale, streng proportional zu ihrer Anzahl, umgesetzt werden (HOLZ 1969, LILJEQUIST und CEHAK 1984).

Die elektromagnetischen Wellen (Ausbreitungsform der elektromagnetischen Strahlung) werden beschrieben durch ihre

- Geschwindigkeit
- Wellenlänge und
- Frequenz.

Die Geschwindigkeit c , mit der sich elektromagnetische Wellen fortbewegen, ist im jeweiligen Medium gleich und wird allgemein als Lichtgeschwindigkeit bezeichnet.

Die Wellenlänge λ ist der Abstand zwischen einer beliebigen Position einer Welle und der gleichen Position der unmittelbar darauffolgenden Welle. Auf der Grundlage der Wellenlänge wird die elektromagnetische Strahlung in Wellenlängenbereiche oder Bänder unterteilt.

Die Frequenz ν ist die Anzahl der Wellenkämme, die in einer bestimmten Zeiteinheit einen vorgegebenen Punkt durchlaufen. Hertz (Anzahl der Wellenkämme pro s) ist die Maßeinheit für die Frequenz. Im Gegensatz zur Geschwindigkeit und Wellenlänge bleibt die Frequenz für die elektromagnetische Strahlung in unterschiedlichen Medien konstant. Geschwindigkeit c , Wellenlänge λ und Frequenz ν stehen wie folgt zueinander im Verhältnis:

$$c = \lambda * \nu \quad (1)$$

2.1.1 Wechselwirkung zwischen elektromagnetischer Strahlung und Materie

Beim Auftreffen von elektromagnetischer Strahlung auf Materie treten - in Abhängigkeit davon, ob diese fest, flüssig oder gasförmig ist - eine Reihe von Interaktionsmechanismen auf. Die Wechselwirkungen zwischen Materie und elektromagnetischer Strahlung können auf der Körperoberfläche (Oberflächenphänomene) oder im Körperinneren (Volumenphänomene) stattfinden. Beide Arten der Interaktion von Strahlung mit Materie haben spezifische Veränderungen der elektromagnetischen Strahlung zur Folge. Mit entsprechenden Meßinstrumenten, wie sie für die Fernerkundung zum Einsatz kommen, können diese spezifischen Veränderungen erfaßt und anhand von Daten und Bildern interpretiert werden. Folgende Wechselwirkungen sind möglich, wenn Strahlung auf Materie trifft:

Reflexion: Die auftreffende Strahlung wird von der Objektoberfläche ohne Änderung der Frequenz der monochromatischen* Strahlungsanteile zurückgeworfen. Man unterscheidet gerichtete und gestreute Reflexion. Gerichtete Reflexion ist die Reflexion ohne Streuung, gemäß den Gesetzen der optischen Spiegelung. Gestreute bzw. diffuse Reflexion liegt bei Reflexion in verschiedenen Richtungen vor, soweit die Gesetze der optischen Spiegelung makroskopisch nicht in Erscheinung treten. Bei der vollkommen gestreuten Reflexion, auch als LAMBERT-Reflexion bezeichnet, ist die Strahldichte der reflektierten Strahlung in allen Richtungen gleich. Die von einem Medium reflektierte Strahlung setzt sich aus der von der Oberfläche reflektierten und der nach Mehrfachreflexion im Medium wieder an die Oberfläche zurückreflektierten Strahlung zusammen (siehe Abschnitt 3.1.3).

Absorption: Die auftreffende Strahlung wird von der Substanz aufgenommen, dabei wird die mitgeführte Strahlungsenergie an die Substanz abgegeben und in andere Energieformen umgesetzt.

Transmission: Die auftreffende Strahlung dringt durch die Substanz hindurch. Die durch das Medium transmittierte Strahlung umfaßt die direkt und die zerstreut (im Medium mehrfach reflektierte) durchdringende Strahlung. Die Ausbreitungsgeschwindigkeit der elektromagnetischen Strahlung wird durch die Transmission von einer Substanz in eine Substanz anderer Dichte verändert. Das Verhältnis aus den beiden unterschiedlichen Geschwindigkeiten wird als Brechungsindex n bezeichnet.

$$n = \frac{C_a}{C_s} \quad (2)$$

C_a : Geschwindigkeit in der Luft
 C_s : Geschwindigkeit in der Substanz

* Strahlung einer bestimmten Wellenlänge

Der auf die Substanzoberfläche bezogene Anteil der reflektierten, absorbierten und transmittierten Strahlung addiert sich zur Gesamteinstrahlung auf, wobei dies in Relationseinheiten wie folgt ausgedrückt werden kann:

$$\text{REF} + \text{ABS} + \text{TRN} = 1 \quad (3)$$

REF: Reflexion

ABS: Absorption

TRN: Transmission

Zu den Wechselwirkungen zwischen Materie und elektromagnetischer Strahlung werden noch die **Emission** und die **Streuung** hinzugerechnet.

Emission: Strahlung wird von einem Körper in Abhängigkeit von seiner Beschaffenheit und Oberflächentemperatur ausgesandt. Jede Materie über dem absoluten Nullpunkt (0° K) emittiert Strahlung in verschiedenen Wellenlängen gemäß dem Planck'schen Gesetz, wobei sich das jeweilige Strahlungsmaximum mit zunehmender Oberflächentemperatur zu kürzeren Wellenlängen hin verlagert (Wien'sches Verschiebungsgesetz, siehe Abb.1).

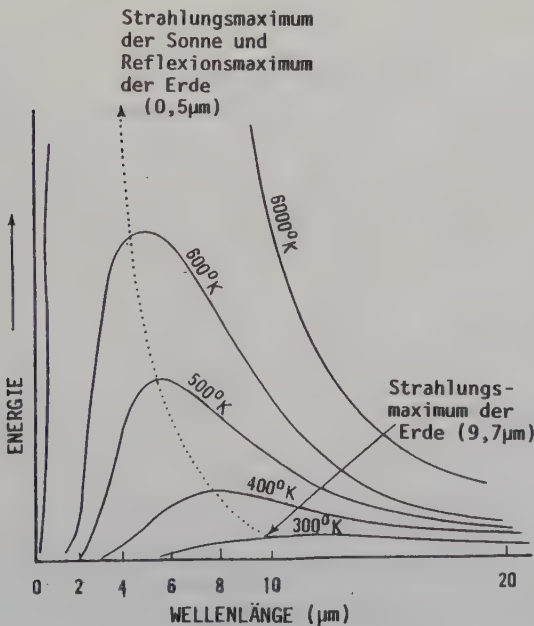


Abb.1: Emissionskurven von Objekten mit unterschiedlicher Oberflächentemperatur (aus SABINS 1978)

Die über alle Wellenlängen integrierte Ausstrahlung läßt sich nach dem Gesetz von Stefan-Boltzmann bestimmen:

$$E = \varepsilon \cdot \sigma \cdot T_0^4 \quad (4)$$

E : Ausstrahlung in Watt m^{-2}
 ε : Emissionsvermögen im jeweils relevanten Wellenlängenbereich
 σ : Stefan-Boltzmann Konstante ($= 5,67 \cdot 10^{-8}$ Watt $m^{-2} K^{-4}$)
 T_0 : Oberflächentemperatur in Kelvin (K)

Bei einem ideal schwarzen Körper* ist $\varepsilon = 1,00$. Für die in der Natur vorkommenden natürlichen Oberflächen streut ε zwischen 0,88 und 0,99 (z.B. Wald : = 0,95) (vgl. JASKOLLA 1975, BAUMGARTNER, MAYER und NOACK 1985).

Gemäß dem Kirchhoff'schen Gesetz ist bei jedem Körper das spektrale Emissionsvermögen gleich dem spektralen Absorptionsvermögen, d.h. über das Emissionsvermögen wird ein Hinweis auf die Strahlungsabsorption im gleichen Wellenlängenbereich gegeben.

Streuung: Elektromagnetische Strahlung wird diffus reflektiert. Durch Streuung wird die Strahlung in ihrer Intensität geschwächt, wobei keine Änderung der Wellenlänge oder Umwandlung in eine andere Energieform stattfindet. Ein bekanntes Beispiel für die ungerichtete Streuung von Licht ist die als Streulicht bezeichnete Mehrfachreflexion des kurzwelligen Lichtes an Gasen oder Partikeln in der Atmosphäre.

* Schwarze Körper: Absorbieren alle auf sie auftreffende Strahlung, wobei die Emission der Absorption entspricht

2.1.2 Das elektromagnetische Spektrum

Das elektromagnetische Spektrum ist ein Klassifikationsschema, bei dem die Wellenlänge als Einteilungskriterium verwendet wird.

Abbildung 2a zeigt das elektromagnetische Spektrum, in dem die Wellenlängen zu Bandbereichen zusammengefaßt sind. Die Übergänge zwischen den Bandbereichen sind fließend.

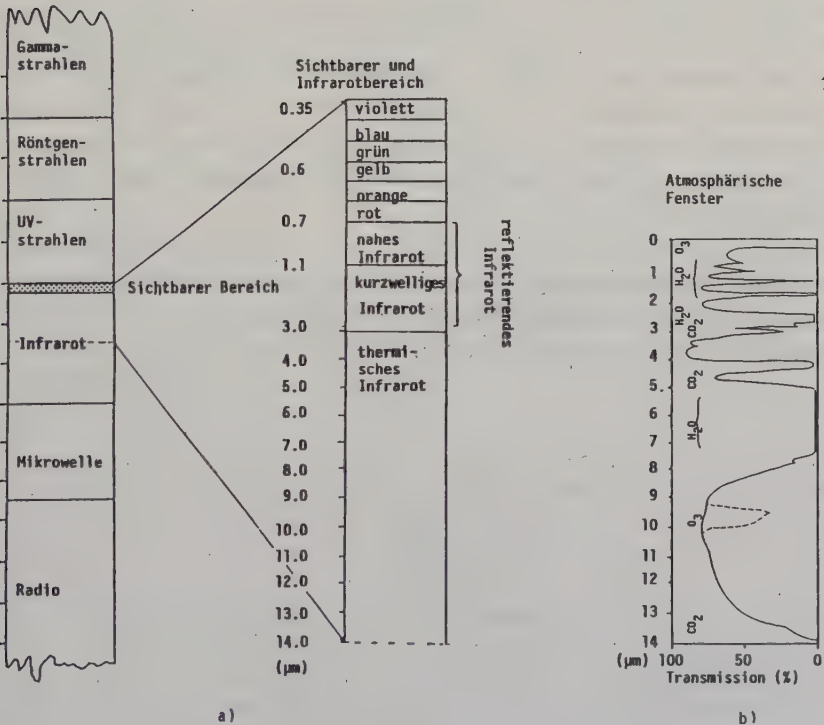


Abb.2a: Das elektromagnetische Spektrum
(aus SABINS 1978)

b: Die Atmosphärischen Fenster verteilt über den Wellenlängenbereich 0,35 μm - 14 μm
(aus SABINS 1978)

Zur Erdbeobachtung sind für die passive Fernerkundung ^{*}₁ die wichtigsten Wellenlängenbereiche der **sichtbare Bereich, der nahe, mittlere und thermische Infrarotbereich**, sowie der Mikrowellenbereich^{*}₂.

Der sichtbare Wellenlängenbereich und die genannten Infrarotbereiche ($0,35 \mu\text{m} - 14 \mu\text{m}$) stehen der terrestrischen Fernerkundung jedoch nur teilweise für Messungen zur Verfügung, da durch den Einfluß der Atmosphäre elektromagnetische Strahlung in bestimmten Wellenlängenbereichen gestreut bzw. absorbiert wird.

Bereiche des Spektrums mit guter Durchlässigkeit der Atmosphäre werden als atmosphärische Fenster bezeichnet (vgl. Abb.2b). Desweiteren werden die auf die Erde bzw. auf das Objekt auftreffenden elektromagnetischen Strahlen durch die Atmosphäre in Abhängigkeit von deren Trübungsgrad modifiziert. Entsprechend ist auch die mit einem Meßinstrument erfaßte, reflektierte oder emittierte Strahlung vom Objekt durch die dazwischen liegende Atmosphäre nochmals verändert.

Je größer die Wellenlänge, desto geringer ist die Modifikation. Wolken sind nur für Wellenlängen größer $0,3 \text{ cm}$ durchlässig.

^{*}₁ Passive Meßverfahren der Fernerkundung:
Erfassen die von einem Objekt natürlich reflektierte oder emittierte elektromagnetische Strahlung

^{*}₂ Mikrowellenbereich:
Bezeichnung für den Wellenlängenbereich 1 mm bis 1 m

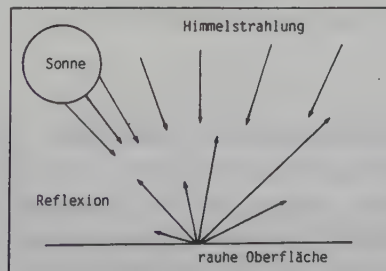
2.2 Physikalische Grundlagen der Reflexion

Die für die Erdbeobachtung eingesetzten Fernerkundungssysteme (hier nicht eingeschlossen die Mikrowelle) messen die reflektierte bzw. emittierte Strahlung im Wellenlängenbereich $0,4\text{ }\mu\text{m}$ bis $14\text{ }\mu\text{m}$. Dabei wird zwischen $0,4\text{ }\mu\text{m}$ und $3\text{ }\mu\text{m}$ reflektierte und zwischen $3\text{ }\mu\text{m}$ und $14\text{ }\mu\text{m}$ vorwiegend emittierte Strahlung erfaßt. Nach dem Kenntnisstand der Wissenschaft ist vor allem die **Reflexion** im Bereich zwischen $0,4\text{ }\mu\text{m}$ und $2,5\text{ }\mu\text{m}$ für Vegetationsauswertungen auf der Grundlage von Fernerkundungsdaten geeignet. Im Rahmen dieser Arbeit wurden ausschließlich Messungen zur **Reflexion von Waldbäumen** in den genannten Wellenlängenbereichen durchgeführt, wobei die für die Interpretation von Reflexionsdaten benötigten Grundlagen in den nachfolgenden Abschnitten besprochen werden.

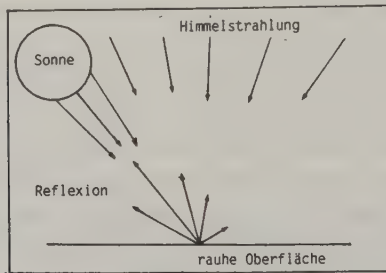
2.2.1 Reflexionsgeometrie

Die Richtungsverteilung der Reflexion hängt von der Haupteinstrahlungsrichtung, von der Rauigkeit und von der Gestalt der reflektierenden Oberfläche ab. In der Natur treten die Vorwärtscharakteristik, die Rückwärtscharakteristik und die diffuse Reflexion als Grundformen der Reflexionsverteilung auf.

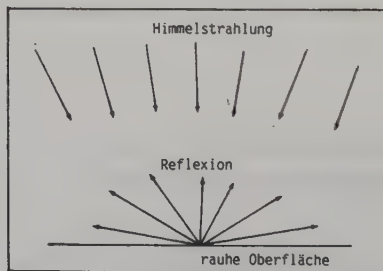
Liegt Vorwärtscharakteristik für die Reflexion vor, wird das einfallende Licht von der Haupteinstrahlrichtung wegreflektiert,



bei Rückwärtscharakteristik wird das einfallende Licht in die Haupteinstrahlrichtung zurückreflektiert und

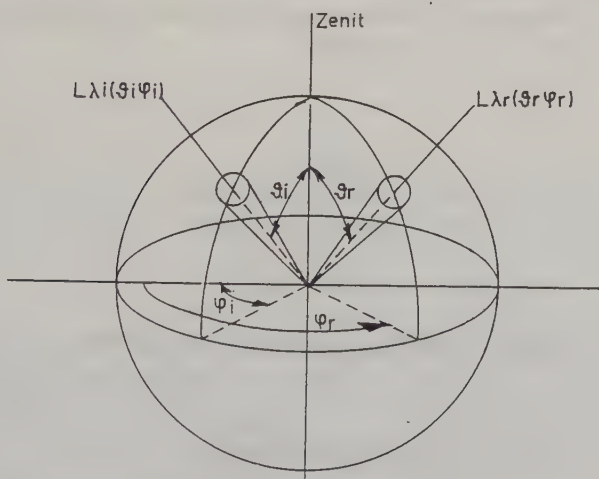


bei diffuser Reflexion wird das einfallende Licht ohne bevorzugte Richtung reflektiert (vgl. HUSS 1984).



Da die gemessenen Reflexionswerte in Abhängigkeit von Einstrahlungs- und Beobachtungsrichtung am gleichen Objekt voneinander stark abweichen können, ist die Kenntnis über die Richtungsverteilung der Reflexion in Abhängigkeit zur Haupteinstrahlungsrichtung von großer Bedeutung.

Wie in Abb.3 dargestellt, wird die Richtung der einfallenden und reflektierten Strahlung durch den Zenitwinkel ϑ * und Azimutwinkel φ ** definiert. Dabei ist der Azimutwinkel φ für die Südrichtung 0° , für die Ostrichtung $+90^\circ$, für die Nordrichtung 180° und für die Westrichtung -90° gesetzt. Der Zenitwinkel ϑ wird von der Nadirlinie ausgehend festgelegt, wobei die Nadirlinie einem Winkel von 0° entspricht (vgl. Abb.3). Die Meß- bzw. Beobachtungsrichtung wird ebenfalls durch Azimut- und Zenitwinkel beschrieben.



$L\lambda_i(\vartheta_i, \varphi_i)$: Einfallende spektrale Strahldichte

$L\lambda_r(\vartheta_r, \varphi_r)$: Reflektierte spektrale Strahldichte

ϑ_i : Einfallszenitwinkel

φ_i : Einfallsazimutwinkel

ϑ_r : Reflexionszenitwinkel

φ_r : Reflexionsazimutwinkel

Abb.3: Reflexionsgeometrie (nach KRIEBEL 1976)

* Zenit: Der Schnittpunkt einer über dem Beobachtungspunkt gedachten senkrechten Linie mit der Himmelskugel

** Azimut: Der Winkel, den ein Vertikal- oder Höhenkreis mit dem Meridian bildet

Neben der exakten Festlegung der Beobachtungsrichtung durch Azimut- und Zenitwinkel wird die Meßrichtung auch vereinfachend durch die Begriffe Mitlicht- und Gegenlichtmessung, sowie quer zur Einstrahlungsrichtung beschrieben.

Mitlicht, Gegenlichtmessung und Messungen quer zur Einstrahlungsrichtung sind durch die Azimutdifferenz zwischen Einstrahlungs- und Meßrichtung bestimmt (vgl. Abb.4). Streng gesehen liegen Mitlichtmessungen vor, wenn die Azimutdifferenz zwischen Einstrahlungs- und Beobachtungsrichtung $\Delta\varphi = 0^\circ$ bis $\Delta\varphi = \pm 45^\circ$ beträgt, Messungen quer zur Einstrahlungsrichtung wenn die Azimutdifferenz zwischen den Werten $\Delta\varphi = \pm 46^\circ$ bis $\Delta\varphi = \pm 134^\circ$ streut und Gegenlichtmessungen wenn die Azimutdifferenz zwischen $\Delta\varphi = \pm 135^\circ$ bis $\Delta\varphi = 180^\circ$ liegt.

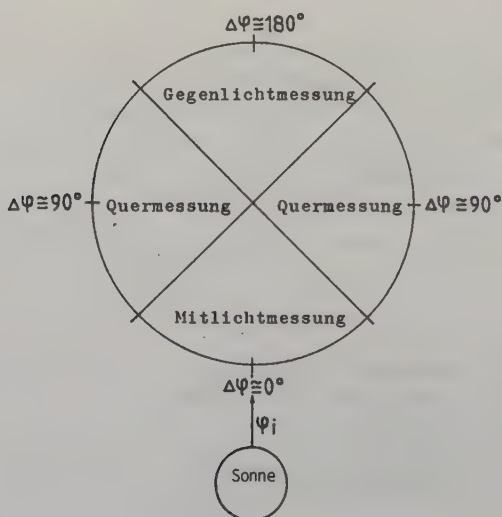


Abb.4: Definition der Meßrichtung (nach KADRO 1981)

2.2.2 Reflexionsgrad

Zur Beschreibung und Darstellung der Reflexionseigenschaften wird der **Reflexionsgrad** bzw. der **Reflexionsfaktor** bestimmt. Quantitativ beschreibt der Reflexionsgrad ρ das Verhältnis zwischen reflektiertem (r) und einfallendem (i) Strahlungsfluß ϕ :

$$\rho = \frac{\phi_r}{\phi_i} \quad (5)$$

Bei gemischter Reflexion kann ρ additiv in den Anteil der spiegelnden Reflexion ρ_r und in den Anteil der diffusen Reflexion ρ_d aufgeteilt werden:

$$\rho = \rho_r + \rho_d \quad (6)$$

Ein Lambert-Reflektor, dessen Reflexionsgrad 1 ist, wird mit dem Index w_L (weißer Lambert-Reflektor) bezeichnet. Für ihn ist

$$\phi_r = \phi_{r,wL} = \phi_i \quad (7)$$

Der Reflexionsgrad eines beliebigen Körpers, der von dem gleichen Strahlungsfluß ϕ_i bestrahlt wird, kann daher auch durch

$$\rho = \frac{\phi_r}{\phi_{r,wL}} \quad (8)$$

beschrieben werden.

Betrachtet man nur ein Flächenelement dA eines reflektierenden Körpers, so läßt sich der Reflexionsgrad durch

$$\rho = \frac{d\phi_r}{d\phi_i} = \frac{d\phi_r/dA}{d\phi_i/dA} = \frac{Mr}{E} \quad (9)$$

Mr : Strahlungsflußdichte der von einem Flächenelement in den Halbraum reflektierten Strahlung (spezifische reflektierte Strahlung)

E : Strahlungsflußdichte der aus dem Halbraum auf ein Flächenelement auftreffenden Strahlung (Bestrahlungsstärke)

ausdrücken. Wird die spezifische Ausstrahlung mit einem weißen Lambert-Reflektor verglichen, so schreibt man

$$\rho = \frac{M_r}{M_r, wL} \quad (10)$$

Der Reflexionsgrad ρ kann auch als **Reflexionsfaktor** $R(\lambda)$ bezeichnet werden. Die reflektierte spektrale Strahldichte wird dann durch das Symbol $L_{\lambda r}$ und die vom weißen Lambertreflektor reflektierte Strahldichte durch das Symbol $L_{\lambda wL}$ (vgl. Abb.3) dargestellt.

$$R(\lambda) = \frac{L_{\lambda r} (\vartheta r \varphi r)}{L_{\lambda wL}} \quad (11)$$

Im Gegensatz zum Labor können im Gelände keine Standardbedingungen geschaffen werden, da die direkte Sonnenstrahlung in ihrer Intensität und spektralen Verteilung zeitlich schwankt. Die Einstrahlungsverhältnisse werden deshalb bei Geländemessungen über die Definition des Reflexionsgrads bzw. Reflexionsfaktors mitberücksichtigt.

Die zur Bestimmung des Reflexionsfaktors wichtige Größe, die Bestrahlungsstärke (E), kann wahlweise direkt über die Integration der Strahlendichte der einfallenden Strahlung ϕ_i über dem Halbraum, oder indirekt über das Anmessen eines Reflexionsstandards erfolgen (siehe Abschn. 4.1.4).

3. STAND DER WISSENSCHAFT ZUR REFLEXION VON PFLANZEN

Die auf die Pflanze auftreffende elektromagnetische Strahlung wird von dieser reflektiert, absorbiert und transmittiert (vgl. Abb.5). Art und Intensität der Wechselwirkungen zwischen Pflanzen und elektromagnetischer Strahlung hängen dabei von der Geometrie, Morphologie und Physiologie der Pflanze ab.

3.1 Laboruntersuchungen zur Reflexion von Blattorganen

Der größte Teil des Wissens zur Reflexion von Pflanzen beruht auf Labormessungen an einzelnen Blattorganen, da im Labor Standardbedingungen geschaffen werden können, die eine gezielte Untersuchung einzelner Parameter erlauben. Auch die in diesem Kapitel vorgestellten Untersuchungsergebnisse zur Reflexion der Pflanzen beruhen auf Labormessungen.

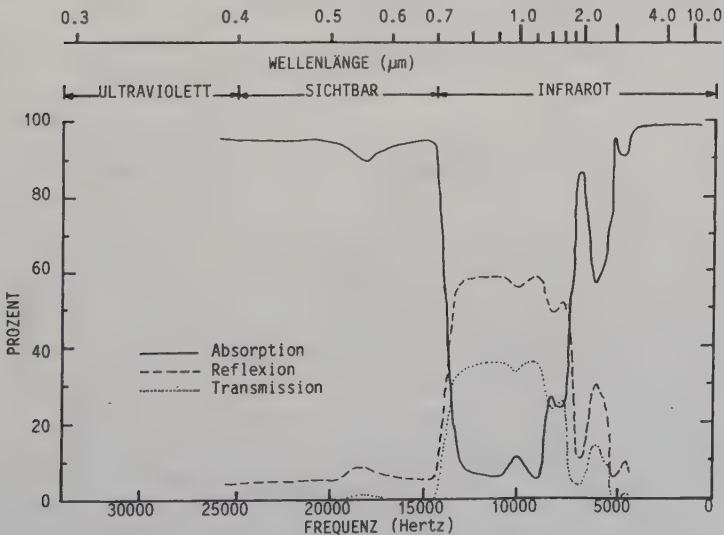


Abb.5: Typischer Kurvenverlauf für die Reflexion, Absorption und Transmission grüner Blattorgane im Wellenlängenbereich 0,4 μm - 4,0 μm (nach GATES 1970)

Wie in Abb. 5 dargestellt, wird der überwiegende Teil der auf grüne Vegetation auftreffenden Strahlung im Blaubereich ($0,4\ \mu\text{m} - 0,5\ \mu\text{m}$) absorbiert, Reflexion und Transmission sind deshalb in diesem Bereich sehr gering. Im Grünbereich ($0,5\ \mu\text{m} - 0,6\ \mu\text{m}$) tritt - bezogen auf den sichtbaren Wellenlängenbereich ($0,4\ \mu\text{m} - 0,7\ \mu\text{m}$) - ein Reflexions- und Transmissionsmaximum auf, analog dazu geht die Absorption zurück. Im Rotbereich ($0,6\ \mu\text{m} - 0,7\ \mu\text{m}$) fällt die Reflexion und Transmission in etwa auf das Niveau des Blaubereichs zurück, bei gleichzeitigem Anstieg der Absorption.

Im nahen Infrarotbereich ($0,7\ \mu\text{m} - 1,1\ \mu\text{m}$) werden hohe Reflexions- und Transmissionswerte erreicht, während die Absorption stark zurückgeht. Unterbrochen ist das Reflexions- und Transmissionsplateau durch zwei kleine Wasserabsorptionsbanden bei $0,9\ \mu\text{m}$ und $1,1\ \mu\text{m}$.

Im kurzwelligen Infrarotbereich ($1,1\ \mu\text{m} - 3,0\ \mu\text{m}$) geht der Anteil der reflektierten und transmittierten Strahlung, bei gleichzeitigem Anstieg der Absorption, zurück. Unterbrochen wird dieser Verlauf durch zwei Reflexions- und Transmissionsmaxima bei $1,7\ \mu\text{m}$ und $2,3\ \mu\text{m}$. Ab $3,0\ \mu\text{m}$ liegt fast keine Reflexion mehr vor.

3.1.1 Einflußfaktoren auf die Reflexion von Blättern

Für die Beeinflussung der Blattreflexion können verschiedene physiologische und morphologische Veränderungen in Pflanzen verantwortlich sein. Die wichtigsten Einflußfaktoren sind

- Pigmentation
- Beschaffenheit der Blattoberfläche
- Zellstruktur und
- Wassergehalt.

Dabei ist die Reflexion von Pflanzen nach Untersuchungen von HOFFER und JOHANNSEN (1968) im sichtbaren Wellenlängenbereich zwischen 0,4 und 0,7 μm überwiegend durch Blattpigmente, im nahen Infrarot zwischen 0,7 bis 1,1 μm überwiegend durch die Zellstruktur, und im kurzwelligen Infrarot zwischen 1,1 μm und 2,6 μm überwiegend durch den Wassergehalt bestimmt (vgl. Abb.6).

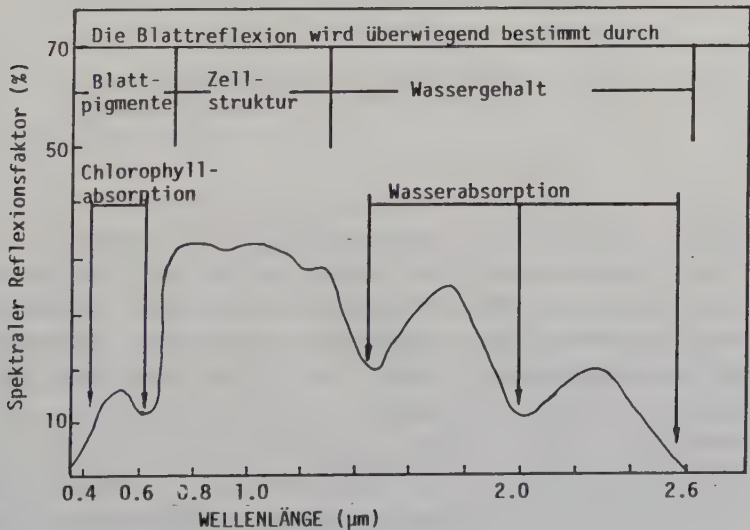


Abb.6: Reflexionskurve grüner Blattoorgane mit den Haupteinflußfaktoren (nach HOFFER und JOHANNSEN 1969)

3.1.1.1 Pigmentation

Im sichtbaren Wellenlängenbereich zwischen 0,4 und 0,7 μm sind die Blattpigmente Chlorophyll, Carotin und Xanthophyll (Tab.1) bestimmend. Ihre Absorptionsmaxima liegen im Blaubereich (um 0,45 μm) und im Rotbereich (um 0,65 μm).

Pigmente	Absorptionsbanden in μm	
Chlorophyll a	0.36 - 0.44	0.60 - 0.70
Chlorophyll b	0.40 - 0.46	0.60 - 0.68
Protochlorophyll	0.40 - 0.46	
Carotin	0.38 - 0.51	
Xanthophyll	0.40 - 0.51	

Tab.1: Absorptionsbanden der Pigmente
(aus HUSS 1984)

Das lokale Reflexions- und Transmissionsmaximum im Grünbereich (0,5 μm - 0,6 μm) ist auf die fehlende Absorption der in Tab.1 aufgelisteten Blattpigmente zurückzuführen. Dieses Reflexions- und Transmissionsmaximum, verbunden mit der besonderen Hellempfindlichkeit des menschlichen Auges im Grünbereich (DIRMHIRN 1964), ist der Grund dafür, daß Blattorgane von Menschen in der Aufsicht, wie in der Durchsicht grün gesehen werden.

In einer Vielzahl von Untersuchungen haben u.a. KADRO (1981), KRITIKOS et al. (1983), KOCH et al. (1985), ROCK et al. (1985), ELLING und KNOPPIK (1986) sowie SCHLOTE et al. (1987) den qualitativen Einfluß, den die Pigmentation auf die Reflexion hat, nachgewiesen.

Die genannten Autoren konnten übereinstimmend für chlorotische Nadeln erhöhte Reflexionswerte im Grün-Gelb-Bereich ($0,55 \mu\text{m} - 0,65 \mu\text{m}$) feststellen. Während bei KADRO (1981) und KRITIKOS et al. (1983) jedoch nur eine Verschiebung des Kurvenniveaus nach oben zu beobachten ist, registrierten die anderen Autoren auch qualitative Veränderungen im Kurvenverlauf, wie in Abb.7 dargestellt ist.

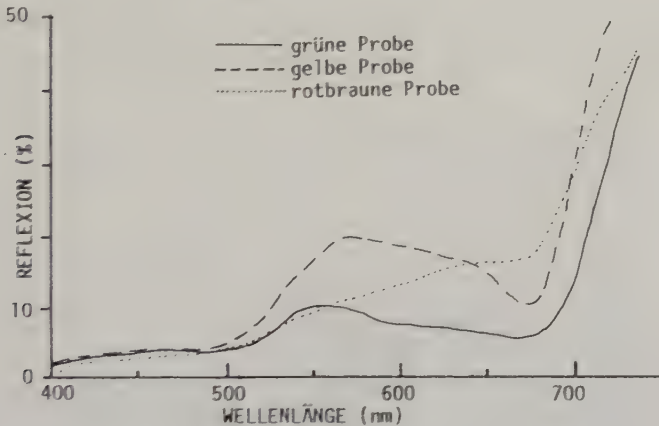


Abb.7: Reflexion chlorotischer Fichtennadeln im Vergleich zu grünen Fichtennadeln im sichtbaren Wellenlängenbereich (nach ELLING und KNOPPIK 1986)

HORLER et al. (1983) haben darüber hinaus einen deutlichen Zusammenhang zwischen Chlorophyllkonzentration und der Lage des Reflexionsanstiegs ($0,62 \mu\text{m} - 0,75 \mu\text{m}$) im Spektrum dokumentiert (red edge). Diese Arbeitsgruppe konnte bei ihren Untersuchungen an Erbsen (*Pisum sativum*), Mais (*Zea mays*) und Sonnenblumen (*Helianthus annuus*) mit zunehmender Chlorophyllkonzentration eine Verschiebung der Reflexionsschulter* ($0,75 \mu\text{m}$) zu kürzeren Wellenlängenbereichen hin bzw. einen steileren Kurvenanstieg beobachten, was durch Vitalitätsuntersuchungen von ROCK et al. (1985) bestätigt wird.

* Reflexionsschulter: Reflexionsmaximum am Übergang zwischen Sichtbarem und nahem Infrarot (um $0,72 \mu\text{m}$)

3.1.1.2 Beschaffenheit der Blattoberfläche

Der Einfluß, den Gestalt und Konsistenz der Blattoberfläche auf die Reflexion ausüben, wurde von GATES (1970) und ELLER (1979) untersucht. In ihren Arbeiten weisen sie einen deutlichen Zusammenhang zwischen Reflexion und Behaarungsdichte sowie eine Abhängigkeit von der Dicke der Wachsauflage nach. Während mit zunehmender Dicke der Wachsauflage die Reflexion im Sichtbaren wie im nahen Infrarot steigt (GATES 1970), nimmt sie mit der Zunahme der Behaarung auf der Blattoberfläche im nahen Infrarot ab (vgl. Abb. 8).

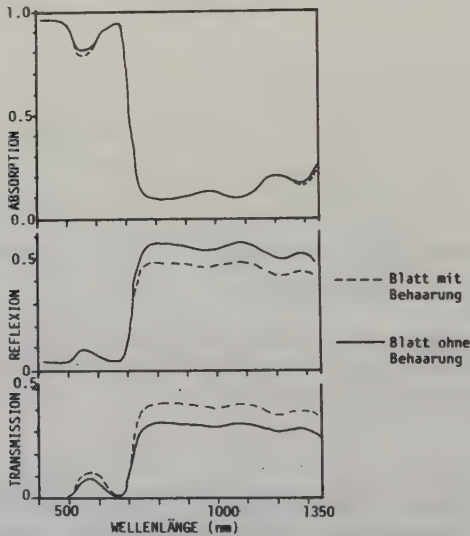


Abb. 8: Spektraleigenschaften von behaarten und unbehaarten Huflattichblättern (*Tussilago farfara*) (nach ELLER 1979)

3.1.1.3 Zellstruktur

Die Kenntnisse über den Einfluß der Zellstruktur auf die Reflexion im nahen Infrarotbereich stützen sich vorwiegend auf Untersuchungen von GATES et al. (1970) und GAUSMAN et al. (1970).

GATES et al. (1970) führten eine Reihe von Laboruntersuchungen an Blattorganen durch, um den Zusammenhang zwischen Blattr reflexion und Blattmorphologie bzw. Zellstruktur zu klären. Die Arbeitsgruppe kam zu dem Ergebnis, daß die auf die Pflanze auftreffende Strahlung zu einem kleinen Teil sofort von der Blättkutikula reflektiert wird, der größte Teil der Strahlung jedoch durch die Kutikula hindurch in das Mesophyll transmittiert. Dort treffen die Strahlen auf die Zellwände auf und werden bei entsprechendem Einfallswinkel reflektiert bzw. gestreut oder verändern durch Brechung ihre Richtung im Blatt (vgl. Abb.9). Durch die große Anzahl der Zellen kommt es zur Mehrfachreflexion bzw. zur mehrfachen Richtungsänderung der Strahlen. Es gelangt daher fast genauso viel Strahlung wieder zum Ausgangspunkt zurück, wie durch das Blatt hindurch transmittiert.

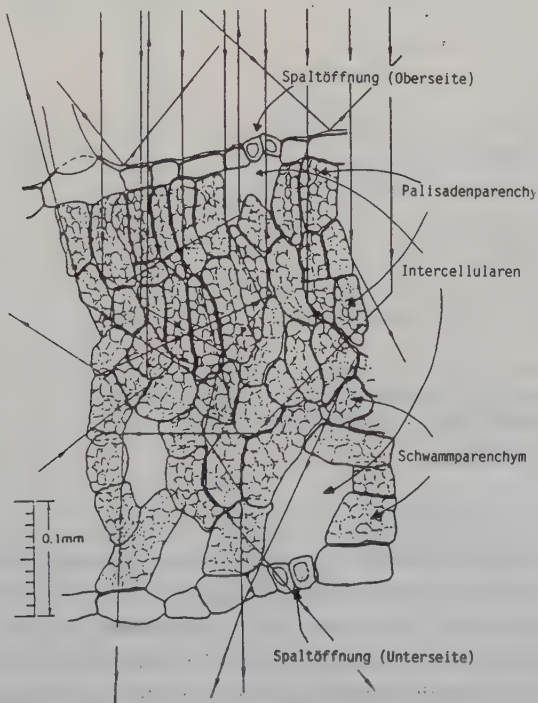


Abb.9: Querschnitt durch ein Laubblatt mit möglichen Lichtwegen (nach GATES 1970)

Im allgemeinen ist die Transmission bei dünnen Blättern größer als die Reflexion, mit zunehmender Blattdicke - d.h. mit steigender Anzahl der Zellen - nimmt die Transmission jedoch ab und die Reflexion überwiegt. Dieser Effekt ist auch für unterschiedlich dicke Lagen übereinandergeschichteter Baumwollblätter zu beobachten, wie Abb.10 zeigt.

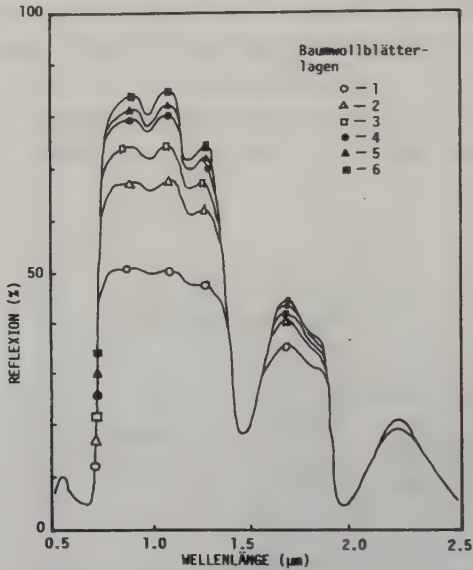


Abb.10: Reflexion für unterschiedlich dicke Lagen übereinandergeschichteter Baumwollblätter (*Gossypium hirsutum*) (nach MYERS 1970)

GAUSMAN et al. (1970) versuchten den Zusammenhang zwischen Zellstruktur und Blattreflexion durch Spektraluntersuchungen während der Zellentwicklung von Baumwollblättern zu klären. Sie beobachteten im Rahmen dieser Untersuchungen einen engen Zusammenhang zwischen der Zunahme der Reflexionsintensität mit dem Blattalter (vgl. Abb.11) und dem altersspezifischen Anstieg der Interzellularen im Blatt (vgl. Tab.2).

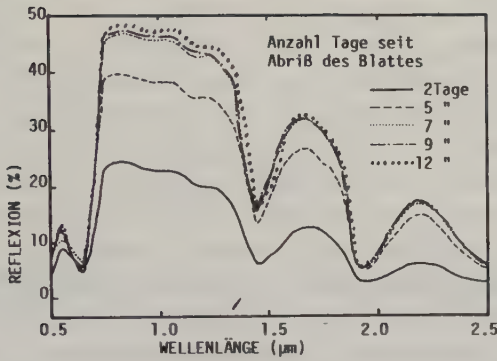


Abb.11: Reflexionskurven unterschiedlich alter Baumwollblätter (*Gossypium hirsutum*) (nach GAUSMAN et al. 1970)

Blattalter	Intercellularräume %
3,5 Tage	10,2 %
5,8 Tage	28,2 %
8 Tage	28,6 %
10,8 Tage	31,9 %
12 Tage	28,8 %

Tab.2: Veränderungen des Anteils an Intercellularräumen mit zunehmendem Blattalter (nach GAUSMAN et al. 1970)

Nach Abschluß der Zellentwicklung konnten sie keine Veränderung in der Reflexion mehr nachweisen. Untersuchungen von HOWARD (1971) an Eichenblättern (*Quercus robur*) bestätigten die von GAUSMAN et al. (1970) vorgelegten Ergebnisse.

GATES et al. (1970) untersuchten Eichenblätter (*Quercus robur*) im Verlauf der Vegetationsperiode und fanden mit zunehmendem Blattalter zunächst eine deutliche Abnahme der Reflexion im nahen Infrarot (April bis Mai) mit anschließendem leichten Wiederaufstieg. Ab Mitte Mai konnten sie keine Veränderungen in der Blattreflexion mehr feststellen, sieht man von den im November gemessenen Herbstblättern ab. GATES et al. (1970) führten die Abnahme der Reflexion, ebenso wie GAUSMAN et al. (1970) bei ihren Untersuchungen die Zunahme, auf Veränderungen in der Zellstruktur des Blattes zurück. Die unterschiedlichen Meßergebnisse von GATES et al. (1970) und GAUSMAN et al. (1970) könnten darauf zurückzuführen sein, daß GATES et al. (1970) für ihre Messungen Blätter verwendeten, die den von GAUSMAN et al. (1970) für die ersten zwei Wochen der Blattentwicklung beschriebenen Effekt der Reflexionsanstieg durch Zunahme der Interzellularen nicht mehr erkennen ließen. Da bei GATES et al. (1970) keine Zellstrukturuntersuchungen zu diesen Messungen vorliegen, fehlen auch Hinweise darauf, wodurch das Absinken der Reflexion verursacht worden sein könnte.

Auch DIRMHIRN (1964) führte Messungen an unterschiedlich alten Blättern der Quitte (*Cydonia oblonga*) durch. Sie fand im sichtbaren Wellenlängenbereich für alte Blätter erhöhte Reflexion und im reflektierenden Infrarotbereich für die Wellenlängen 1,2 μm , 1,3 μm und 1,7 μm geringere Reflexion im Vergleich zu jungen Blättern. Für die restlichen Wellenlängen im Infrarotbereich konnte sie keine Unterschiede in der Reflexion zwischen alten und jungen Blättern feststellen.

Der Einfluß der Zellstruktur des Blattes auf die Reflexion wird auch durch Untersuchungen von Sonnen- und Schattenblättern bestätigt. So untersuchten DIRMHIRN (1964) und ELLER et al. (1981) die Reflexion von Schatten- und Sonnenblättern der Buche (*Fagus sylvatica*) und fanden übereinstimmend im Sichtbaren höhere und im nahen bis mittleren Infrarot geringere Reflexionsintensitäten für Schattenblätter, verglichen mit Sonnenblättern (vgl. Abb.12).

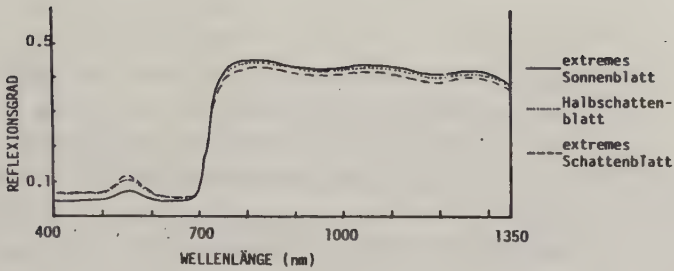


Abb.12: Reflexionseigenschaften von Schatten- und Sonnenblättern der Rotbuche (*Fagus sylvatica*) (nach ELLER et al. 1981)

Betrachtet man die anatomischen Unterschiede in der Blattstruktur zwischen Sonnen- und Schattenblättern, so werden die von GATES et al. (1970) und GAUSMAN et al. (1970) gefundenen Abhängigkeiten zwischen Zellstruktur und Reflexion plausibel. Wie Abb.13 zeigt, haben Schattenblätter im Vergleich zu Sonnenblättern eine geringere Blattdicke und weniger Interzellularen.

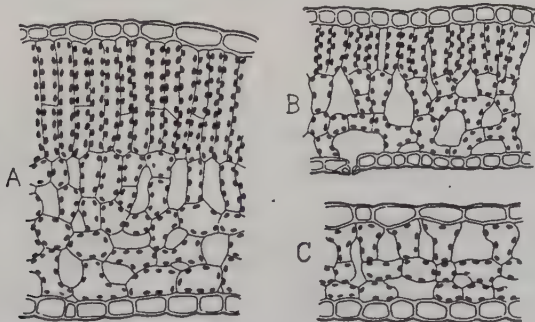


Abb.13: Querschnitt durch ein Laubblatt von *Fagus sylvatica*

- A Sonnenblatt
- B Blatt mit mittlerem Lichtgenuß
- C Schattenblatt

(aus STRASBURGER 1978)

Die Reflexionsunterschiede zwischen Schatten- und Sonnenblättern konnten in späteren Untersuchungen von GAUSMAN (1984) auch am Beispiel von Orangenblättern (*Atrus sinensis*) bestätigt werden.

3.1.1.4 Wassergehalt

Als vierte wichtige pflanzenspezifische Einflußvariable auf die Reflexion gilt der Wassergehalt. So dokumentiert MYERS (1970) mit seinen Untersuchungen an Pflanzen die in feuchten und trockenen Böden herangezogen wurden, daß diejenigen Pflanzen mit guter Wasserversorgung im Vergleich zu denjenigen mit schlechter Wasserversorgung im Bereich zwischen $0,75\text{ }\mu\text{m}$ und $1,35\text{ }\mu\text{m}$ weniger stark reflektieren, wie dies in Abb.14 gezeigt wird.

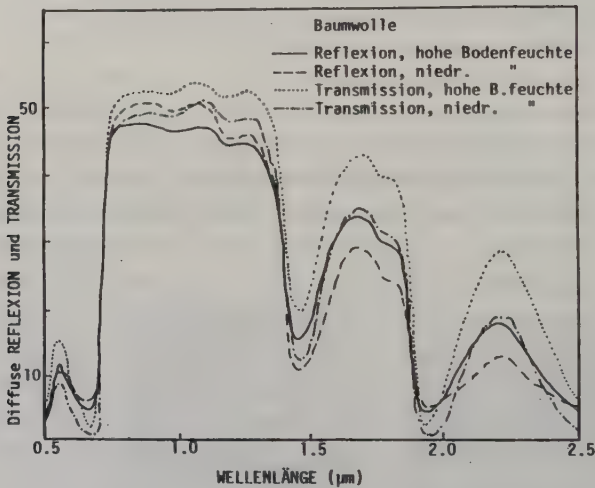


Abb.14: Reflexion und Transmission von Baumwollpflanzen, die unter verschiedenen Feuchtigkeitsbedingungen aufwuchsen (nach MYERS 1970)

Zwischen $1,5\text{ }\mu\text{m}$ und $2,5\text{ }\mu\text{m}$ ist jedoch die Reflexion der Pflanzen mit guter Wasserversorgung höher als für die mit schlechter Wasserversorgung. Für den Wellenlängenbereich um $1,9\text{ }\mu\text{m}$ sind keine Reflexionsunterschiede erkennbar.

Neuere Untersuchungen über den Einfluß des Wassergehalts im nahen bis mittleren Infrarot liegen von TUCKER (1980) vor. Er fand allerdings für Blätter mit hohem Wassergehalt geringere Reflexionswerte für den gesamten Infrarotbereich ($0,7\text{ }\mu\text{m} - 2,5\text{ }\mu\text{m}$).

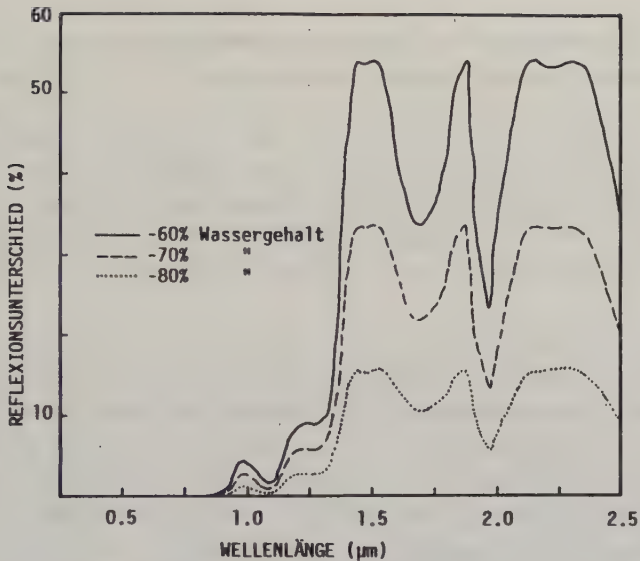


Abb.15: Reflexionskurven für Blätter mit unterschiedlichem Wassergehalt (nach TUCKER 1980)

Dabei stellte er für die Wellenlängenbereiche $1,83 \mu\text{m} - 1,88 \mu\text{m}$, $1,9 \mu\text{m} - 2,05 \mu\text{m}$ und $2,1 \mu\text{m} - 2,3 \mu\text{m}$ die stärkste Abhängigkeit zwischen Wassergehalt und Reflexion fest. Er führt dies auf folgende zwei Faktoren zurück:

1. Erhöhung der Dichte des Blattes durch Schrumpfen und
2. Veränderung des Brechungsindex im Blatt mit zunehmendem Wasserverlust.

Nicht geklärt ist die Frage, inwieweit die während der Austrocknung auftretenden Reflexionsunterschiede auch auf Veränderungen der Blattform bzw. -stellung zurückzuführen sind.

3.1.2 Reflexionsmessungen an Pflanzen mit Schwermetallbelastung und unterschiedlicher Nährstoffversorgung

Schwermetallbelastung oder Unterschiede in der Nährstoffversorgung führen zu physiologischen und morphologischen Veränderungen in den Blattorganen. Diese durch Schwermetallbelastung und Nährstoffmangel bewirkten Veränderungen in den Blattorganen können dann über die Reflexion erfaßt werden.

1966 wurden von THOMAS et al. die ersten Untersuchungen über den Einfluß verschiedener **Stickstoffmengen auf die Reflexion** von Baumwollblättern durchgeführt. Sie dokumentieren für den sichtbaren Bereich und kurzwelligen Infrarotbereich abnehmende Reflexionswerte mit zunehmendem Stickstoffmangel der Pflanzen. Zu vergleichbaren Ergebnissen kam MYERS (1970) für den Bereich $1,3\ \mu\text{m}$ - $2,5\ \mu\text{m}$. Im sichtbaren Bereich und Infrarotbereich zwischen $0,7\ \mu\text{m}$ und $1,3\ \mu\text{m}$ zeigten die Meßwerte jedoch für Blätter mit Stickstoffmangel höhere Reflexionswerte als für diejenigen ohne Stickstoffmangel (vgl. Abb. 16).

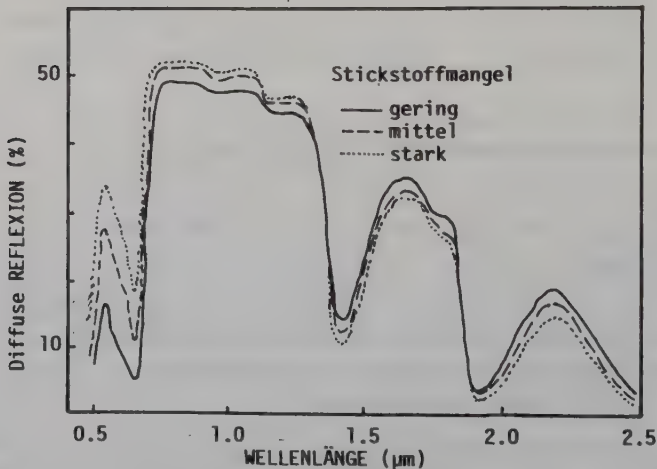


Abb.16: Reflexionskurven für Blätter mit unterschiedlicher Stickstoffversorgung (nach MYERS 1970)

Untersuchungen zur Schwermetallbelastung von YOST und WENDEROTH (1971) und SCHWALLER et al. (1983) zeigen, daß die auftretenden Reflexionsveränderungen im nahen Infrarot artspezifisch unterschiedlich sein können. Während SCHWALLER et al. (1983) bei Pflanzen mit Kupferbelastung erhöhte Reflexionswerte feststellten (vgl. Abb.17), konnten YOST und WENDEROTH (1971) für ebenfalls mit Kupfer belastete Fichten höhere und für Tanne sowie Kiefer geringere Reflexionswerte nachweisen.

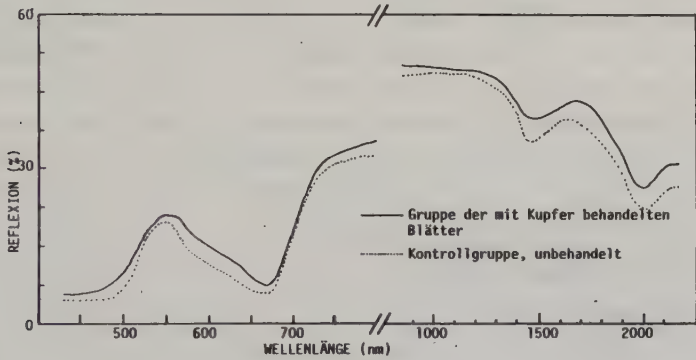


Abb.17: Veränderung der Reflexionsintensität durch Schwermetallbelastung nach SCHWALLER et al. (1983)

Im sichtbaren Bereich hingegen finden die Autoren übereinstimmend mit der Zunahme der Schwermetallbelastung einen Anstieg der Reflexion.

3.2 Feldspektroskopie

Die Feldspektroskopie ermöglicht die Einbeziehung des natürlichen Umfeldes und Lebensrhythmus der Vegetation bei gleichzeitiger hoher spektraler und räumlicher Auflösung. Im wesentlichen werden Feldspektroradiometermessungen bisher im reflektiven Wellenlängenbereich zwischen 0,4 μm und 3,0 μm , und nur vereinzelt im emittierenden Wellenlängenbereich zwischen 3,0 μm und 15 μm durchgeführt.

Die Festsetzung eines Meßkonzepts für Feldspektroradiometermessungen erfordert große Sorgfalt, da keine standardisierten Meßbedingungen im Gelände vorliegen. Um aussagefähige Daten zu erhalten, ist es deshalb unabdingbar, den qualitativen und quantitativen Einfluß der objektunabhängigen Parameter auf die Meßwerte abschätzen zu können. Die objektunabhängigen Einflußparameter können ihrem Ursprung nach

- dem Lebensraum
- der Meßsystemanordnung und
- dem Meßsystem

zugeordnet werden.

3.2.1 Einflußparameter des natürlichen Lebensraums

Die wichtigsten das Meßsignal beeinflussenden objektunabhängigen Parameter des natürlichen Lebensraums sind:

- Einstrahlungs- und Beobachtungsgeometrie
- Atmosphäre
- Wetter
- Belaubungsdichte *

* Die Belaubungsdichte wurde hier den objektunabhängigen Parametern zugeordnet, da der Einfluß auf die Reflexion nicht durch physiologische oder morphologische Veränderungen der Blattorgane hervorgerufen wird.

3.2.1.1 Einstrahlungsgeometrie

Zur Reflexionsgeometrie von Vegetationseinheiten liegen eine Reihe von Geländeuntersuchungen über landwirtschaftliche Flächen vor, für Wald beschäftigen sich jedoch nur wenige Arbeiten mit dieser Fragestellung.

KESSLER (1985) untersuchte in einer ausführlichen klimatologischen Langzeitstudie die kurzwellige Albedo * ($0,3 \mu\text{m} - 3,0 \mu\text{m}$) eines Kiefernbestandes unter verschiedenen Einstrahlungswinkeln der Sonne. Er dokumentiert einen engen Zusammenhang zwischen dem Anstieg der Sonnenhöhe und dem Absinken der Albedo. Wie in Abb.18 zu sehen ist, sinkt dieser enge Zusammenhang mit zunehmendem Bedeckungsgrad des Himmels.

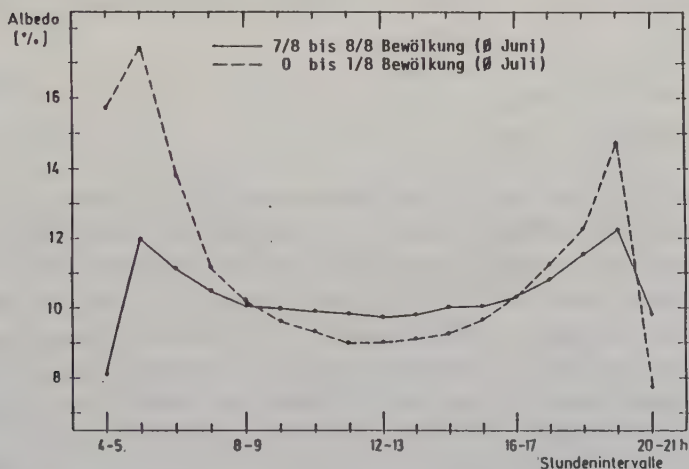


Abb.18: Mittlerer Tagesgang der Albedo (%) des Hartheimer Kiefernwaldes für die Jahre 1974 - 1982.

* Albedo: Verhältnis der von einer Fläche reflektierten zu der gesamten auf sie einfallenden Strahlung, bezogen auf einen größeren (meist den gesamten kurzwelligen) Spektralbereich

KESSLER (1985) weist in seiner Arbeit auch auf den starken Einfluß, den die Bestandesstruktur bei freier Einstrahlung auf die Albedo hat, hin. Bei Messungen über dem Halbraum fand er bei quasi isotroper Einstrahlung (bedeckter Himmel) einen sehr viel symmetrischeren Kurvenverlauf der Albedo im Tagesgang, da hier der Einfluß der Bestandesstruktur abgeschwächt wird.

KRIEBEL (1976, 1978) gibt in seinen Untersuchungen zur Abhängigkeit der Reflexion vom Sonnenzenitwinkel für Satellitendaten über Moorflächen, Grünland und Nadelwald pro Grad Veränderung des Sonnenzenitwinkels eine durchschnittliche Abweichung der reflektierten Strahlung um $\pm 1\%$ an.

3.2.1.2 Atmosphäre

Die Atmosphäre beeinflusst qualitativ und quantitativ die auf das Objekt auftreffende und vom Objekt zum Meßinstrument reflektierte Strahlung durch

- Absorption und
- Streuung.

Absorption und Streuung hängen unmittelbar vom Trübungsgrad und Feuchtigkeitsgehalt der Atmosphäre ab. Die Schwächung der Strahlung durch Absorption und Streuung in der Atmosphäre wird als Extinktion bezeichnet (DIRMHORN 1964). Durch Referenzmessungen können die durch Extinktion bewirkten Schwankungen in der Intensität und spektralen Verteilung der Globalstrahlung ^{*1} berücksichtigt werden. Die Veränderungen der auf das Spektroradiometer auftreffenden reflektierten Strahlung durch Luftlicht ^{*2} wird nicht erfaßt.

Zur Abschätzung des Luftlichtanteils für die gemessenen Strahlungswerte wurde von Kriebel (1976) ein Kalkulationsmodell in Abhängigkeit vom Trübungsgrad der Atmosphäre und der Meßdistanz entwickelt. In Abb.19 ist nach dem Kalkulationsmodell der Anteil des Luftlichtes in Prozent der Gesamtstrahlung in Abhängigkeit vom Trübungsgrad der Atmosphäre und der Flughöhe aufgetragen.

^{*1} Globalstrahlung: Summe der auf eine horizontale Fläche auftreffenden Sonnen- und Himmelstrahlung.

^{*2} Luftlicht: Anteil des in der Atmosphäre gestreuten Lichtes, das auf die Optik des Meßinstrumentes trifft.

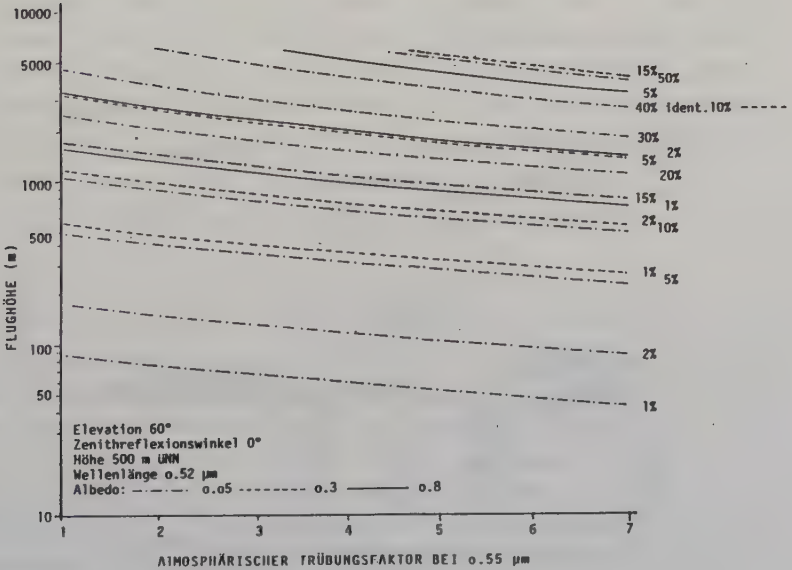
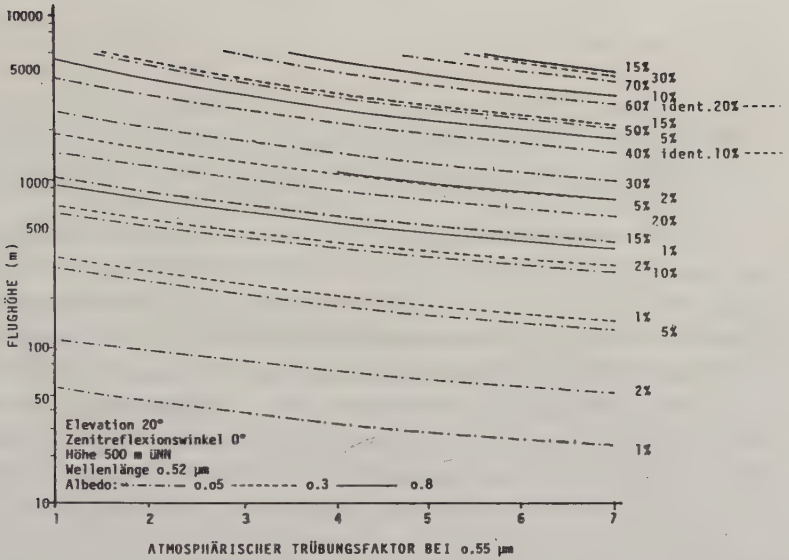


Abb.19: Anteil des Luftlichtes in % der Gesamtstrahlung für 20° und 60 ° Sonnenelevation bei 0° Reflexionszenitwinkel (nach KRIEBEL 1976)

3.2.1.3 Wetter

Geht man davon aus, daß Messungen im Gelände nur während der Vegetationszeit und bei trockener Witterung durchgeführt werden, sind die am stärksten die Reflexionsmessungen beeinflussenden Wetterfaktoren Wind und Bewölkung.

Der Einfluß, den die Bewölkung auf die Intensität und spektrale Zusammensetzung der Einstrahlung hat, wird bei DIRMHIRN (1964) ausführlich beschrieben. Die durch Bewölkung verursachten Unterschiede in der Einstrahlung werden durch Referenzmessungen der Globalstrahlung berücksichtigt, soweit nicht rasch wechselnde Bewölkung einer zufriedenstellenden Erfassung der Beleuchtungssituation entgegensteht. Nicht ausgeglichen werden durch den Referenzwert jedoch Veränderungen in der Reflexion, die durch die unterschiedliche Ausleuchtung der Objekte bei geschlossener Bewölkung bzw. freier Einstrahlung verursacht werden (siehe KESSLER 1985).

Der Wind als zweiter wichtiger Wetterfaktor beeinflusst die Meßwerte durch die von ihm verursachten Blattbewegungen. Die Veränderung der Blattstellung führt zu einem veränderten Reflexionswinkel und durch Verdrehung der Blattunterseite nach oben auch zu veränderten Reflexionsintensitäten. Je kleiner der Meßausschnitt ist, desto stärker wirken sich die Effekte der veränderten Blattstellung auf den Meßwert aus, wie dies beispielhaft in Abb.20 dargestellt ist.

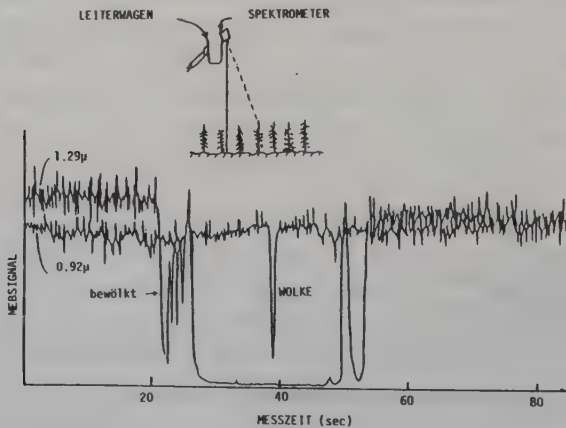


Abb.20: Reflexionswerte eines fixierten Meßausschnittes in zwei Wellenlängen. Das Datenrauschen wird verursacht durch Windbewegungen der Blätter, das Absacken der Meßwerte durch auftretende Bewölkung (nach HOLMES 1970)

3.2.1.4 Belaubbungsdichte

Die Symptome für die neuartigen Waldschäden sind vorwiegend geprägt durch den Verlust grüner Blattorgane. Es wurden daher vor allem in den letzten Jahren Untersuchungen zur Charakterisierung der Änderung der Reflexion bei unterschiedlicher Blattdichte durchgeführt. Die ersten Untersuchungen dazu liegen von RIOM (1981) für südfranzösische Kiefernbestände vor. Anhand multitemporaler Reflexionsmessungen im nahen Infrarotbereich ($0,7 \mu\text{m} - 1,1 \mu\text{m}$) fand er mit zunehmender Entnadelung der Bäume im Herbst ein Absinken der Reflexion; im Frühjahr stieg die Reflexion ab einem bestimmten Durchlässigkeitskoeffizienten jedoch wieder an. Er führte dies auf den Einfluß des Untergrundes zurück und wies durch systematische Untersuchungen nach, daß sich der Einfluß des Untergrundes auf die Reflexion bei dicht benadelten bzw. undurchlässigen Kiefernkrönen wie

$$R_S = R_B = R_N \quad (12)$$

und bei durchlässigen Kiefernkrönen wie

$$R_B > R_S > R_N \quad (13)$$

verhält.

R_S : Reflexion von Kiefern über Grasboden

R_B : Reflexion von Kiefern über einer weißen Platte

R_N : Reflexion von Kiefern über einer schwarzen Platte

RIOM (1981) zieht daraus den Schluß, daß der Untergrund starken Einfluß auf die Reflexion geschädigter Kiefernbestände hat. Auch HERRMANN et al. (1986) dokumentierten ein Ansteigen der Reflexion im nahen und kurzwelligen Infrarot über stark vergilbten und lichten Kiefernbeständen.

Auf der Grundlage von Flugzeugscannerdaten untersuchten KRITIKOS et al. (1983) und KOCH et al. (1984) erstmals für Fichte den Einfluß von Nadelmassenverlust auf deren Reflexion. Während KRITIKOS et al. (1983) Untersuchungen an Bäumen vornahmen, die sowohl Vergilbungen als auch Nadelverlust aufwiesen, waren die von uns untersuchten Fichten (*Picea abies*) (KOCH et al. 1984) ausschließlich durch Blattverluste gekennzeichnet.

Wie Abb.21 zeigt, ergaben sich bei diesen Untersuchungen für Fichten mit Nadelverlusten im Vergleich zu vollbenadelten leicht erhöhte Reflexionswerte im sichtbaren Bereich und deutlich geringere im nahen Infrarot.

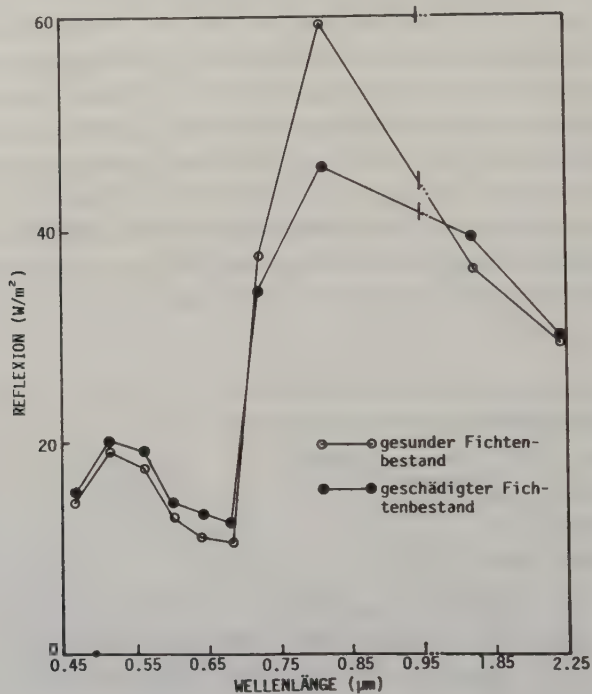


Abb.21: Signaturkurven aus Flugzeugaufnahmen über stark entadelten und gesunden Fichten (*Picea abies*) nach KOCH et al. (1984)

In stark aufgelockerten Fichtenbeständen (KOCH et al. 1984) haben wir die von RIOM (1981) für Kiefer gefundenen Ergebnisse - nämlich eine Überprägung der Kronenreflexion durch dichte Bodenvegetation im Untergrund - bestätigen können. Auch ergaben sich Hinweise darauf, daß bei Bäumen oder Beständen mit Nadelverlusten auch veränderte Licht- und Schattenverhältnisse als Ursache für das Absinken der Reflexion im nahen Infrarotbereich in Betracht gezogen werden müssen.

Neue Reflexionsuntersuchungen über Nadelverluste bei Fichte liegen von kanadischen und amerikanischen Arbeitsgruppen vor. So hat die Arbeitsgruppe TEILLET et al. (1985) für *Picea balsamea* mit zunehmender Entnadelung einen Anstieg der Reflexion im sichtbaren Wellenlängenbereich ($0,4 \mu\text{m}$ - $0,7 \mu\text{m}$) ein Absinken der Reflexion im nahen Infrarot ($0,7 \mu\text{m}$ - $1,1 \mu\text{m}$) und abermals einen Anstieg im kurzwelligen Infrarot ($1,1 \mu\text{m}$ - $2,4 \mu\text{m}$) beobachtet (vgl. Abb.22).

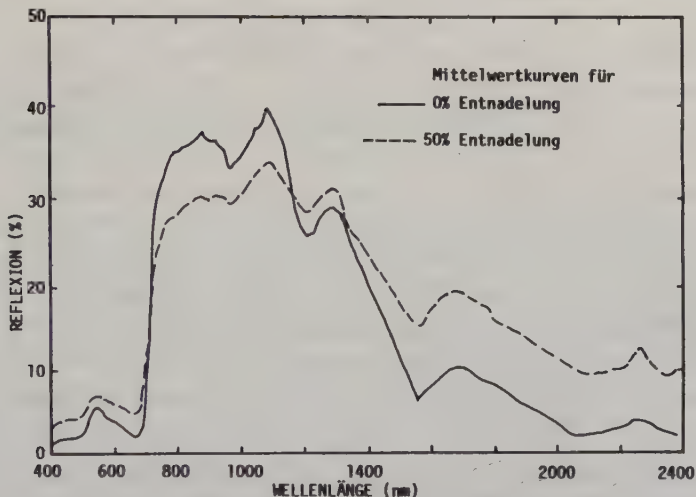


Abb.22: Reflexionskurven von *Picea balsamea* mit unterschiedlichem Entnadelungsgrad (nach TEILLET et al. 1985)

Für Reflexionsmessungen über landwirtschaftlichen Flächen verweist MYERS (1970) auf die Bedeutung des "Leaf area index" (LAI) *. Er beschreibt bei Abnahme des LAI ein Absinken der Reflexion. Geht man davon aus, daß der Boden bei landwirtschaftlichen Flächen meist unbewachsen und dunkelfarbig ist, würde dies den Ergebnissen über Wald entsprechen.

* LAI: Verhältnis aller Blattoberflächen eines Baumes zu dessen vertikaler Projektionsfläche am Boden

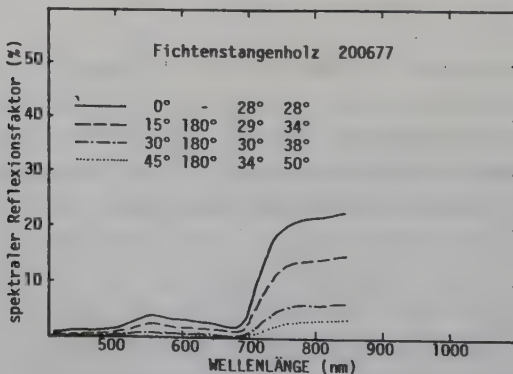
3.2.2 Einflußparameter der Meßsystemanordnung

Zu den Einflußparametern der Meßsystemanordnung gehören

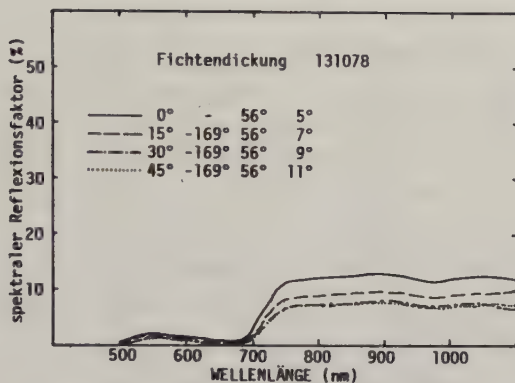
- Beobachtungsrichtung und
- Referenzwerterfassung.

3.2.2.1 Beobachtungsrichtung

Der Meßzenit- und Meßazimutwinkel (s. S.12 ff) haben in Abhängigkeit vom Sonnenstand einen entscheidenden Einfluß auf die gemessenen Reflexionswerte. Eine der wenigen Arbeiten, die sich mit diesen Einflußparametern über Wald beschäftigt, ist die von KADRO (1981). Er untersuchte die Veränderung der Reflexion eines Fichten- und Kiefernjungbestandes bei Messungen quer zur Einstrahlungsrichtung sowie bei Mitlicht- und Gegenlichtmessungen (s. S.14) für unterschiedliche Meßzenitwinkel. Die Messungen wurden 10 m über dem Bestand vorgenommen. Er dokumentiert für Messungen **in Mitlicht-richtung** mit größer werdendem Meßzenitwinkel von 0° bis 30° ein Ansteigen der Reflexion über das gesamte Meßspektrum (0,4 μ m - 0,9 μ m). Bei 45° Meßzenitwinkel ist die Reflexion bei sehr kleinem Sonnenzenitwinkel geringer als bei 30° Meßzenitwinkel, jedoch bei großem Sonnenzenitwinkel stärker. Allgemein ergeben sich mit steigendem Sonnenzenitwinkel zunehmend höhere Reflexionswerte. Diese Ergebnisse wurden sowohl für Fichtenjungbestände als auch für Kiefernjungbestände erzielt (vgl. Abb.23).



a) Fichtenstangenholz

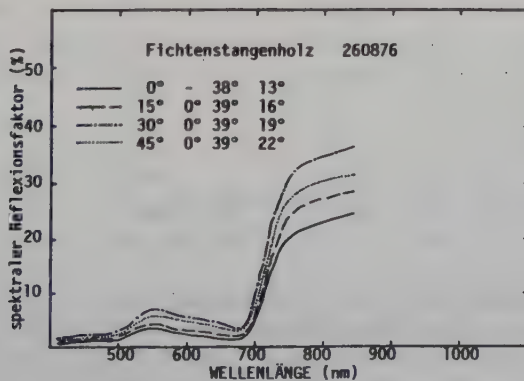


b) Fichtendickung

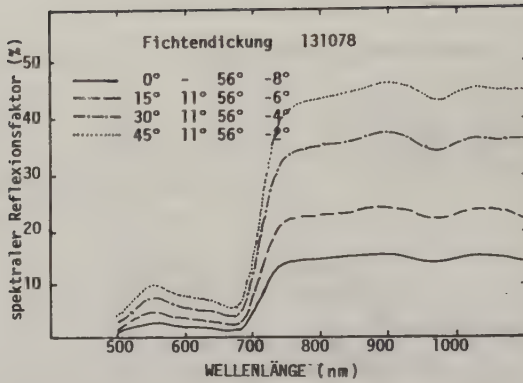
Abb. 23: Reflexionskurven von Fichtenjungbeständen gemessen in Mitlichtrichtung (nach KADRO 1981)

Bei Messungen in **Gegenlichtrichtung** (vgl. Abb.24) zeigten sich für die Fichtendickung mit zunehmendem Meßzenitwinkel abnehmende Reflexionswerte in allen gemessenen Spektralbereichen (0,4 μm – 0,9 μm). Das gleiche Bild ergab sich für Fichtenstangenholz, wobei hier die Abnahme der Reflexion mit steigendem Meßzenitwinkel deutlicher ausgeprägt war als für die Fichtendickung. Insgesamt war die Reflexion in Gegenlichtrichtung geringer als in Mitlichtrichtung.

Die Kiefernbestände unterschieden sich bei den Gegenlichtmessungen in ihrem Reflexionsverhalten deutlich von Fichtenjungbeständen. Mit zunehmendem Meßzenitwinkel stieg hier die Reflexion im nahen Infrarotbereich (0,75 μm – 0,9 μm) an. Im sichtbaren Wellenlängenbereich ergaben sich im Vergleich zu den Meßwerten der Fichte keine gesicherten Unterschiede.



a) Fichtenstangenholz



b) Fichtendickung

Abb. 24: Reflexionskurven von Fichtenjungbeständen gemessen in Gegenlichtrichtung (nach KADRO 1981)

Die Messungen quer zur Einstrahlrichtung (vgl. Abb. 25) ergaben für Fichtenjungbestände die höchsten Reflexionswerte bei einem Meßzenitwinkel von 15° und 30°. Für Kiefernjungbestände wurden die höchsten Reflexionswerte bei einem Meßzenitwinkel von 45° erzielt.

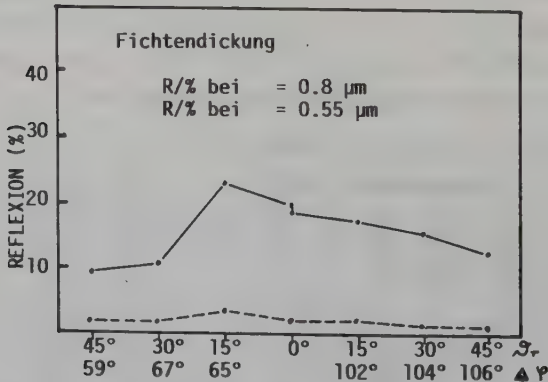


Abb. 25: Reflexionskurven eines Fichtenjungbestandes gemessen quer zur Einstrahlungsrichtung (nach KADRO 1981)

Vergleichbare Untersuchungen über die Abhängigkeit der Reflexion von der Beobachtungsrichtung bei Fichte und Kiefer liegen von KLEMAN (1985) vor. Die von ihm präsentierten Ergebnisse entsprechen trotz der unterschiedlichen Meßmethode (Hubschraubermessungen) denen KADROS (1981). Er bestätigt die deutlichen Unterschiede im Reflexionsverhalten zwischen Fichte und Kiefer in Gegenlichtposition. Um die Zenitwinkelabhängigkeit bei Messungen zu reduzieren, schlägt KLEMAN vor, für Reflexionsuntersuchungen einen möglichst großen Meßausschnitt zu wählen*.

3.2.2.2 Referenzwerterfassung

Für die Vergleichbarkeit der gemessenen Reflexionswerte kommt der Erfassung der Einstrahlungsverhältnisse (Referenzwert) größte Bedeutung zu.

Bei Überfliegungen werden meist große weiße Tücher als Referenzflächen in der Nähe der Meßflächen ausgerollt oder es dienen natürliche, einheitlich strukturierte Flächen - z.B. große Rasenflächen oder Gewässer - als Referenzstandard.

In der Feldspektroskopie sind mehrere Methoden zur Referenzwerterfassung beschrieben. Nach DIRMHIRN (1964) ist für die Messung der Globalstrahlung ein Pyranometer zu verwenden, d.h. ein Strahlungsmeßgerät mit einem Öffnungswinkel von 180° , mit dem die aus der Himmelshalbkugel einfallende Strahlung erfaßt werden kann. Häufig beschriebene Methoden zur Referenzwerterfassung sind jedoch auch das Anmessen einer diffus reflektierenden weißen Fläche (ROCK et al. 1985) und die Messung der einfallenden Strahlung über eine am Spektroradiometer angebrachte Streuscheibe, die ebenso wie das Pyranometer die aus der Himmelshalbkugel einfallende Strahlung in Abhängigkeit von der Wellenlänge erfaßt (KLEMAN 1985 und TEILLET et al. 1985).

* Eine umfassende Diskussion zur Beeinflussung der Baumreflexion durch den Einstrahlungswinkel erfolgt im Rahmen der Präsentation eigener Ergebnisse.

3.2.3 Einflußparameter des Meßsystems

Die wichtigsten vom Meßsystem abhängigen Einflußparameter sind

- der Öffnungswinkel
- der Meßbereich
- die Meßgenauigkeit
- die spektrale und radiometrische Auflösung
- die Meßzeit
- die Gerätestabilität

Diese Einflußparameter führen in Abhängigkeit vom Meßgerätetyp zu spezifischen Veränderungen in den Meßwerten.

Der Vergleich von Daten ist deshalb nur dann möglich, wenn eine exakte Eichung der Meßgeräte erfolgt ist.

Nachdem zu diesen Fragen im methodischen Teil dieser Arbeit ausführlich Stellung genommen ist, kann hier auf eine weitere Erörterung verzichtet werden.

4. MATERIAL UND METHODE

4.1 Technische Ausstattung

Für die im Rahmen dieses Forschungsansatzes durchgeführten Messungen stand ein vom Lehrstuhl für Biophysik in Hannover angefertigtes Spektroradiometer mit Fernsteuerungs- und Aufzeichnungsgeräten zur Verfügung. Die Gerätespezifikationen wurden prinzipiell durch die Anforderungen des Forschungsvorhabens vorgegeben und sind im Verlauf einer intensiven Erprobungsphase im Labor und Gelände mehrmals modifiziert worden.

4.1.1 Gerätekonfiguration

Die Gerätekonfiguration, differenziert nach Gelände- und Labormessausrüstung, ist in Abb.26 dargestellt.

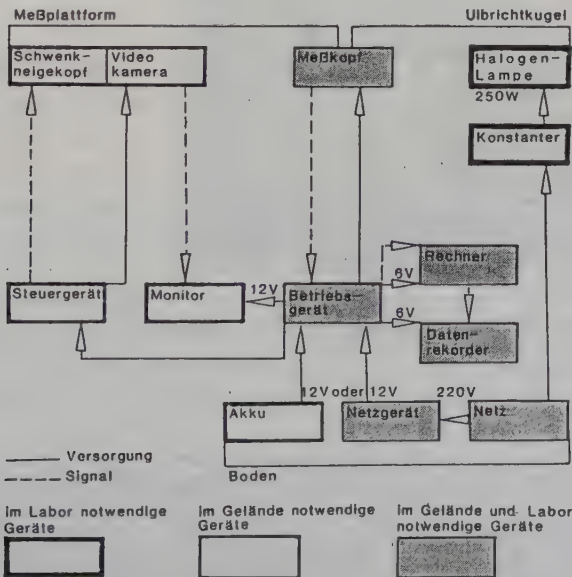


Abb.26: Blockschaltbild der Gerätekonfiguration

Für **Messungen im Gelände** wird das Spektroradiometer zusammen mit der Videokamera am Schwenkneigekopf befestigt (vgl. Abb.27) und dieser wird an einer Drehleiter oder einem Meßturm angebracht.



Abb.27: Geländeausrüstung mit ausgefahrener Drehleiter

Die Spannungsversorgung und die Übertragung der Steuer- und Meßsignale vom Spektroradiometer zum Betriebsgerät am Boden erfolgt über eine Kabelverbindung. Desweiteren ist der Schwenkneigekopf über eine Steuerleitung, in der die Versorgung und die Steuerimpulse für den Schwenkneigekopf sowie die Versorgung für die Videokamera laufen, mit dem Steuergerät verbunden. Das Videosignal wird über eine gesonderte Leitung auf den Monitor

übertragen. Am Boden befinden sich Betriebsgerät, Steuergerät für den Schwenkneigekopf, Rechner, Datenrekorder und der Monitor. Das Betriebsgerät stellt die Versorgungsspannung zur Verfügung und wird mit einer 12 V Autobatterie oder über Netz mit Strom versorgt. Es stellt je 12 V für das Steuergerät und den Monitor, auf dem die Meßausschnitte der verschiedenen Blendenöffnungen gekennzeichnet sind, 6 V für den Rechner, auf dem das Betriebsprogramm läuft und 6 V für den Datenrekorder, der als Massenspeicher dient, bereit. Das Betriebsprogramm im Rechner hat die Aufgabe:

- den Meßvorgang zu steuern,
- aus dem Wert des Photowiderstands das Meßsignal zu errechnen und abzuspeichern,
- den Spiegel im Meßkopf umzuklappen, so daß auf die Optik nacheinander wechselnd einmal Strahlung durch die Öffnung für die Objektmessung, und dann durch die - um 180° versetzte - Streuscheibenöffnung für die Referenzmessung trifft und
- die Daten auf Kassette zu übertragen (vgl. CLAUSEN 1986).

Für **Laboruntersuchungen** dient als Meßstation eine Photometerkugel (Ulbrichtkugel) (vgl. Abb.28). Das Spektroradiometer wird für die Messungen in der Photometerkugel in einer eigens dafür vorgesehenen Öffnung in der Mitte der oberen Kugelhälfte eingehängt. Durch die Lage der Spektroradiometeröffnung in der Photometerkugel wird das Meßobjekt senkrecht von oben gesehen, wie dies auch meist im Gelände der Fall ist.

Als Lichtquelle dient eine 250 Watt Halogenlampe, deren Spektrum Tageslichtcharakteristik aufweist. Das Licht, das seitlich durch eine Öffnung in der oberen Kugelhälfte einfällt, wird durch einen vorgesetzten Schirm abgelenkt, damit das Objekt nur diffus gestreutes Licht treffen kann.

Zur Einbringung der Untersuchungsgegenstände können die Kugelhälften der Photometerkugel auseinandergeklappt werden. Video- und Schwenkneigekopfvorrichtung werden im Labor nicht benötigt, da das Objekt über die Visier- vorrichtung am Spektroradiometer angepeilt werden kann.

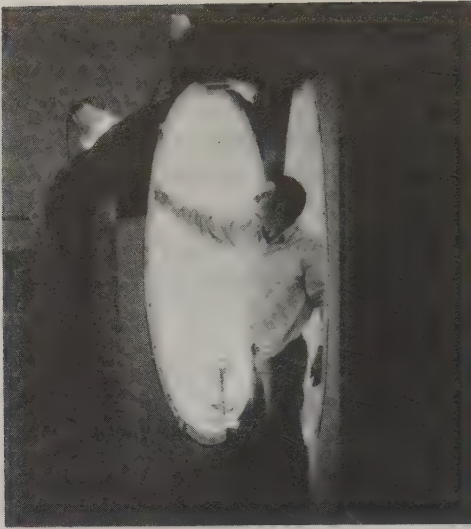


Abb.28: Photometerkugel

4.1.1.1 Spektroradiometer

Das Spektroradiometer (vgl. Abb.29) ist wie folgt spezifiziert:

- | | |
|---------------------------|---|
| - Gesamtmeßbereich | 0.4 μm - 2.2 μm |
| - Anzahl der Einzelkanäle | 56 |
| - Öffnungswinkel | 5°, 10°, 15°, 20° und 22,5° |
| - Detektoren | Silizium (VIS* + NIR*)
Bleisulfid (NIR* + SWIR*) |
| - Referenz | Die Einstrahlung wird über eine mit
Standardfarbe (Kodak reflectance paint)
beschichtete Metallplatte und über eine
Streuscheibe erfaßt. |
| - Filter | Verlaufsinterferenzfilter |

* VIS: Sichtbarer Wellenlängenbereich (0.4 - 0.7 μm)
* NIR: Naher Infrarotbereich (0.7 - 1.1 μm)
* SWIR: Kurzwelliger Infrarotbereich (1.1 - 2.2 μm)

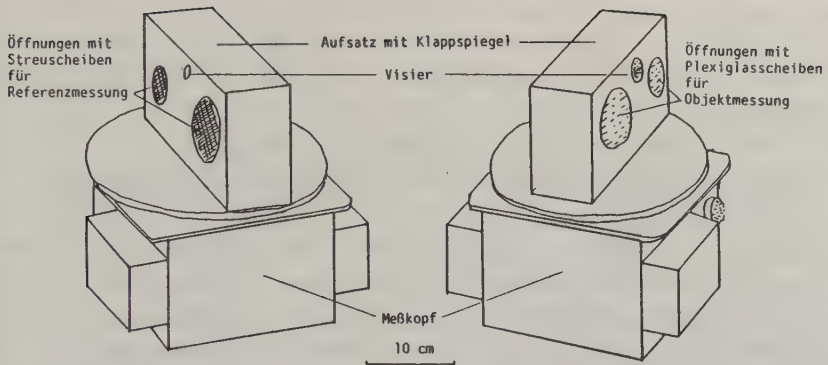


Abb.29: Schema des Meßkopfes

4.1.1.1.1 Spektralkanäle des Spektroradiometers

Das Spektroradiometer mißt im Wellenlängenbereich von $0.4 \mu\text{m}$ - $2.2 \mu\text{m}$, wobei die Auflösung im sichtbaren Bereich ($0.42 \mu\text{m}$ - $0.69 \mu\text{m}$) 10 nm und im nahen Infrarotbereich ($0.7 \mu\text{m}$ - $1.14 \mu\text{m}$) 20 nm beträgt. Der kurzwellige Infrarotbereich wird durch 5 Aufnahmekanäle ($1.3 \mu\text{m}$, $1.65 \mu\text{m}$, $1.8 \mu\text{m}$, $2.0 \mu\text{m}$ und $2.2 \mu\text{m}$) abgedeckt.*

Die dichte Anordnung der Aufnahmebereiche im Sichtbaren und nahen Infrarot wurde gewählt, da

- nach GATES (1970) in diesen Bereichen die deutlichsten pflanzen-spezifischen Differenzierungen zu erwarten sind,
- die optoelektronischen Scannersysteme zur Erdbeobachtung die Mehrzahl ihrer Aufnahmekanäle im Sichtbaren und nahen Infrarot haben und
- eine hohe spektrale Auflösung bis $1.14 \mu\text{m}$ technisch und elektronisch vom Lehrstuhl für Biophysik innerhalb der vorgegebenen Konstruktionszeit gut bewältigt werden konnte.

Im kurzwelligen Infrarotbereich war eine Beschränkung auf wenige Aufnahmebereiche aus technischen und finanziellen Gründen erforderlich. Es wurde

* Im nachfolgenden Text stehen die Bezeichnungen sichtbarer Bereich, naher und kurzwelliger Infrarotbereich für die hier definierten Wellenlängen

eine gezielte Auswahl der nach heutigen Kenntnissen wichtigsten Spektralbereiche für die Pflanzenspektroskopie innerhalb des kurzwelligen Infrarot getroffen. Nach Untersuchungsergebnissen von TUCKER (1980) und GATES (1970) sind die Wellenlängenbereiche um 1.5 μm , 1.8 μm , 2.0 μm und 2.2 μm besonders für die Erfassung des Wassergehaltes in Pflanzen geeignet. Zur Abschätzung des atmosphärischen Wasserdampfes bieten sich nach SABINS (1978) die Wellenlängenbereiche um 1.3 μm , 1.65 μm , 1.8 μm und 2.2 μm an. Die atmosphärische CO_2 -Absorption kann über den Wellenlängenbereich um 2.0 μm abgeschätzt werden (SABINS 1978). Es wurden daher für das kurzwellige Infrarot die Aufnahmebereiche 1.3 μm , 1.65 μm , 1.8 μm , 2.0 μm und 2.2 μm festgelegt. Der von TUCKER empfohlene Kanal bei 1.5 μm wurde zugunsten einer Angleichung an den Erdbeobachtungssatelliten "Thematic mapper" und die häufig in Europa für pflanzenspezifische Messungen zum Einsatz kommenden Flugzeugscanner "Daedalus" und "Bendix" durch einen Kanal bei 1.65 μm ersetzt.

Die Fensterbreiten der einzelnen Kanäle sind der Tab.3 zu entnehmen.

Sichtbarer Bereich	0.4 μm - 0.69 μm	$\Delta \lambda$ 10 nm
Nahes Infrarot	0.7 μm - 1.1 μm	$\Delta \lambda$ 20 nm
Kurzwelliges Infrarot	1300 μm	$\Delta \lambda$ 39 nm
	1650 μm	$\Delta \lambda$ 81 nm
	1800 μm	$\Delta \lambda$ 101 nm
	2000 μm	$\Delta \lambda$ 62 nm
	2200 μm	$\Delta \lambda$ 123 nm

Tab.3: Fensterbreiten für die Kanäle im Sichtbaren, im nahen Infrarot und kurzwelligen Infrarot
(nach ERNST 1987)

4.1.1.1.2 Optik des Spektroradiometers

Legt man entlang der Filterachse einen Schnitt durch den Meßkopf, so zeigt sich in Vorder- bzw. Seitenansicht eine Anordnung der Meßkopfelemente entsprechend den Darstellungen in Abb.29a und 29b.

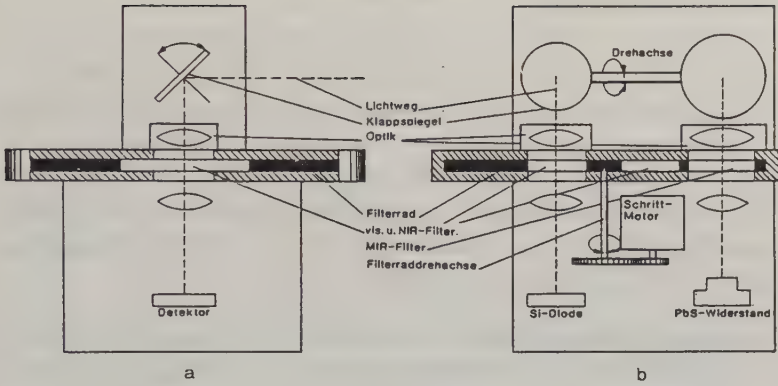


Abb.30: Längsschnitt durch den Meßkopf

a Seitenansicht

b Vorderansicht

Die Optik des Meßkopfes ist so konzipiert, daß der Lichtstrahl vom Spiegel auf das Objektiv abgelenkt und von dort auf die Blendenebene abgebildet wird (vgl. Abb.31). In der Blendenebene wird der Meßwinkel α durch die Größe der gewählten Blendeneffnung definiert. Das Filter sitzt hinter der Objektivlinse, so daß eine beinahe gemeinsame Objektiv-Filterebene entsteht. **Diese Objektiv-Filterebene wird vom Projektiv, das sich unmittelbar hinter der Blende befindet, auf dem Detektor so abgebildet, daß alle Punkte des Objekts, die in den definierten Bildwinkel fallen, genau den gleichen Anteil am Meßergebnis haben** (vgl. ERNST 1987).

STRAHLENGANG - SCHEMA

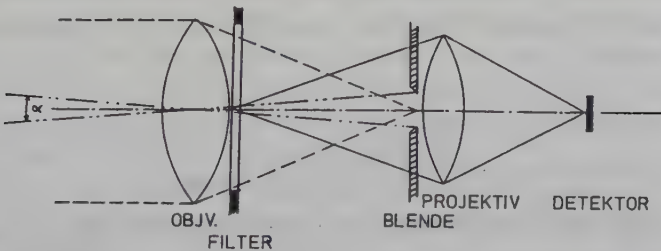


Abb.31: Strahlengangschema im Spektroradiometer (nach ERNST 1987)

4.1.1.1.3 Elektronik des Spektroradiometers

Das auf den Siliziumdetektor auftreffende Signal (VIS- und NIR-Bereich) wird durch einen Gleichspannungsverstärker verstärkt und über einen Schalter auf einen Spannungsfrequenzwandler gegeben. Der Siliziumdetektor ist auf eine Betriebstemperatur von 35° C eingeregelt und in seiner Form dem Schlitz vor dem Filter angepaßt. Vom Spannungsfrequenzwandler wird dann ein Rechtecksignal mit einer Frequenz, die proportional zur Eingangsspannung ist, über die Meßleitung ausgegeben.

Für den SWIR-Bereich wurde ein Bleisulfiddetektor verwendet, der auf eine Betriebstemperatur von 5° C gekühlt wird. Der Bleisulfiddetektor sitzt auf einer Brückenschaltung und ist mit einer Rechteckspannung von 200 Hz versehen. Im anderen Brückenweig liegt die gleiche, aber um 180° phasenverschobene Rechteckspannung am Festwiderstand an. Das Signal aus der Verstimmung der Brücke wird auf einen gegengekoppelten Wechselspannungsverstärker gegeben und dessen Ausgangssignal mit einem Operationsverstärker gleichgerichtet. Dieses Gleichspannungssignal kommt dann über den bereits erwähnten Schalter auf den Spannungsfrequenzwandler und wird von dort in der schon beschriebenen Weise auf die Meßleitung ausgegeben (vgl. CLAUSEN 1986).

4.1.1.1.4 Kalibrierung des Spektroradiometers und der Filter

Die Eichung des Spektroradiometers erfolgte am Lehrstuhl für Biophysik. Als Eichnormal wurde eine Wolframbandlampe mit einer Schwarzkörpertemperatur von 2400° K verwendet, deren Band eine Höhe von 8 mm und eine Breite von 1,6 mm hat.

Untersucht wurden:

- der Einfluß des Meßwinkels bei konstantem Meßabstand
- der Einfluß des Meßabstandes bei konstantem Meßwinkel und
- die Reproduzierbarkeit der Meßwerte innerhalb eines eintägigen und eines mehrtägigen Zeitraums bei konstantem Meßabstand und Meßwinkel.

Die Auswertung dieser Eichmessungen ergab nach CLAUSEN (1986), bezogen auf die in dieser Meßanordnung verwendete punktförmige Strahlenquelle

- für die Veränderung des Meßwinkels eine Abweichung der Meßwerte bis zu 3 %,
- für die Veränderung des Abstandes von der Strahlenquelle um jeweils das Doppelte und konstantem Meßwinkel eine nicht quadratische Abnahme des Meßsignals und
- für die Reproduzierbarkeit innerhalb eines Tages übereinstimmende Werte, für mehrtägige Messungen jedoch unerwartet große Unterschiede.

Die Nichtlinearität des Spektroradiometers wurde rechnerisch bei der Datenaufbereitung korrigiert. Die Reproduzierbarkeit der Daten über einen längeren Zeitraum ist durch Wiederholungsmessungen am Institut für Biophysik und durch eigene Messungen zu einem späteren Zeitpunkt nochmals überprüft worden. Diese zweiten Eichmessungen zeigten befriedigende Übereinstimmung der Meßwerte. Die zunächst aufgetretenen starken Abweichungen für mehrtägige Messungen werden daher auf Fehler in der Eichvorrichtung zurückgeführt.

Nach ERNST (1987) ergab die Gesamtfehlerbetrachtung eine Meßungenauigkeit von 3,6 %, der Fehler für den Langzeitdrift wird auf nochmals 3 % geschätzt.

Zur Eichung des Verlaufsinterferenzfilters wurde als Standard ein mit HeNe Laser und Penray Niederdrucklampe geeichter Gittermonochromator verwendet (vgl. CLAUSEN 1986). Da bei diesem Filter im Sichtbaren und nahen Infrarot ein Zusammenhang zwischen Filterposition und Wellenlänge maximaler Transmission besteht, wurde der Meßkopf auf verschiedene diskrete Positionen eingestellt und dann der Monochromator durchgefahen, bis ein Maximum in der Anzeige des Meßkopfs erreicht war. Aus der sich daraus ergebenden Eichkurve wurde die Position des Verlaufsinterferenzfilters - gemessen in Schritten des Schrittmotors, der das Filterrad antreibt - festgelegt.

4.1.1.2 Meßsystemanordnung zur Referenzwerterfassung

Für Spektralmessungen im Gelände mit passiven Meßsystemen dient die Sonne als natürliche Strahlungsquelle. Das Sonnenlicht schwankt jedoch in seiner Gesamtintensität und spektralen Zusammensetzung. Aussagen zur Reflektivität eines Objektes erfordern daher die Einbeziehung der Einstrahlungsbedingungen, wie sie im konkreten Fall für das Meßobjekt vorliegen. Im allgemeinen wird deshalb bei Felduntersuchungen der Reflexionsgrad als Maß für die Reflektivität angegeben. Quantitativ beschreibt der Reflexionsgrad das Verhältnis zwischen reflektierter und einfallender Strahlung (s. Kap.2.2). Intensität und spektrale Zusammensetzung der Einstrahlung wird üblicherweise mit Hilfe eines Lambert-Reflektors bestimmt. Der Lambert-Reflektor bewertet die aus dem Halbraum einfallende Globalstrahlung, hierbei ist die horizontale Exposition des Lambert-Reflektors vorgeschrieben. Eine möglichst gute Erfüllung des Cosinusetzes, d.h. eine Bewertung der unter verschiedenen Einfallswinkeln auftretenden Strahlung nach dem Cosinus des Einfallswinkels, sollte durch den verwendeten Lambert-Reflektor gegeben sein (DIRMHORN 1964). Als Meßobjekt wird dabei eine horizontale, ebene Fläche zugrundegelegt.

Das Meßobjekt Wald unterscheidet sich jedoch durch seine stark inhomogen strukturierte und oft nicht horizontal ausgerichtete Oberfläche wesentlich von dieser Vorgabe. Eine ideale Referenzwerterfassung im Wald wäre daher durch das Einsprühen der Bäume mit mattweißer Farbe und zum anderen durch das Bedecken der Bäume mit einem "ideal" weißen Tuch zu erreichen. Beide Methoden der Referenzwerterfassung sind jedoch technisch nicht durchführbar.

Als Kompromiß wurde deshalb die Globalstrahlung indirekt über eine - nach der Objektmessung dem Objektiv in 1 m Abstand vorklappbare - mit weißer Standardfarbe (Kodak reflectance paint) beschichtete Metallplatte angemessen (vgl. Abb.32).

Diese Kontrollmessung erfolgte regelmäßig nach der Objektmessung.



Abb.32: Spektroradiometer mit ausgeklappter Referenzscheibe, Videokamera und Schwenkneigekopf

Diese Art der Referenzwerterfassung ist in ihrer Handhabung einfach. Die Anbringung am Meßkopf und die Möglichkeit der Fernsteuerung erlauben es, die Referenzmessung nahe der Meßfläche vorzunehmen. Dies ist bei Meßflächen in größeren geschlossenen Waldgebieten von Vorteil, da Referenzmessungen unabhängig von verfügbaren Freiflächen durchgeführt werden können. Nachteile dieser Art der Referenzwerterfassung sind:

- Durch die räumliche Entfernung vom Meßobjekt kann auf die Referenzfläche im Vergleich zur Objektfläche ein etwas verändertes Spektrum treffen, da die aus der Umgebung reflektierte und auf die Referenzscheibe auftreffende Strahlung eine andere ist als die unmittelbar beim Objekt.
- Die Beleuchtung auf den unterschiedlich geneigten Oberflächen der Bäume entspricht nicht völlig derjenigen auf der Kodakreferenzscheibe.

- Das Referenzspektrum wird erst nach Durchlaufen des gesamten Meßspektrums aufgenommen. Durch diese zeitliche Verschiebung um circa 2,5 Minuten zum Meßspektrum können rasch wechselnde Einstrahlungsunterschiede nicht erfaßt werden.
- Teile der Referenzscheibe werden bei bestimmten Positionen der Sonne vom Meßinstrument abgeschattet.

Im Zuge der Geräteverbesserungen wurde daher die Möglichkeit geschaffen, den Referenzwert in jedem Spektralbereich sofort nach der Objektmessung zu erfassen. Dies geschieht über einen dem Objektiv vorklappbaren Spiegel, der die Optik im Wechsel durch die Eingangsöffnung für die Objektmessung (klares Plexiglasfenster) und Referenzmessung (mattes, aufgerauhtes Plexiglasfenster*) blicken läßt (vgl. Abb.29). Die zeitliche Verschiebung zwischen Meßwert und Referenzwert wird durch die Klappspiegeltechnik auf wenige Sekunden verkürzt.

Damit ergeben sich gegenüber der Kodakreferenzscheibe folgende Vorteile:

- fast gleichzeitige Erfassung von Referenz- und Objektwert,
- keine Beeinträchtigung des Referenzwertes durch Beschattung der Referenzfläche und
- vereinfachte Handhabung durch rechnergesteuerte Referenzwert-erfassung.

Die Nachteile der Referenzwerterfassung durch die Streuscheibe sind:

- die für die Kodakreferenzscheibe bereits beschriebenen Nachteile durch die räumliche Entfernung zur Meßfläche und
- die Expositionsabweichungen zwischen der Oberfläche des Meßobjekts und der Referenzfläche**, sowie
- leicht erhöhte Objektmeßwerte durch das über die Streuscheibe diffus einfallende Licht.

* Streuscheibe

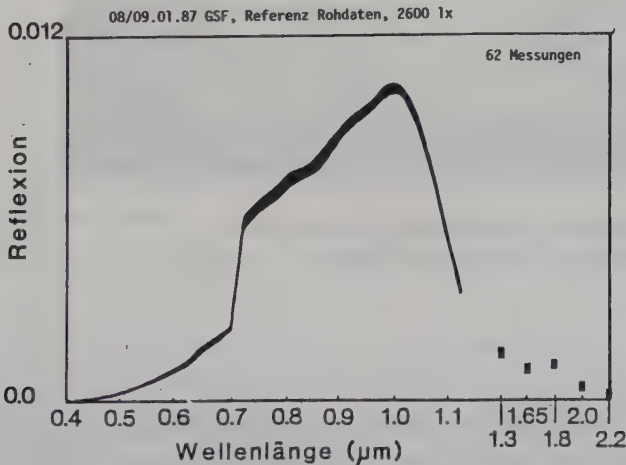
** Durch Messungen im obersten Kronenbereich mit einer Sonnenelevation von $> 45^\circ$ wurde versucht, Beleuchtungsunterschiede gering zu halten.

4.1.1.3 Eigene Tests zur Erprobung des Spektroradiometers

Zur Abschätzung der Meßeigenschaften des Spektroradiometers unter Geländebedingungen wurden eigene Gerätetests durchgeführt. Dazu wurde ein Teil der im Gelände auftretenden Außenbedingungen im Labor simuliert.

4.1.1.3.1 Reproduzierbarkeit der Meßwerte

Wie bereits dargelegt, ließen die am Institut für Biophysik durchgeführten Eichmessungen zur Reproduzierbarkeit der Meßwerte innerhalb eines mehrtägigen Zeitraums zunächst keine gesicherten Aussagen zu. Es wurden daher eigene Messungen zur Überprüfung der Reproduzierbarkeit der Daten über einen Zeitraum von 48 Stunden durchgeführt. Die Eichmessungen wurden in der Photometerkugel (Ulbrichtkugel) vorgenommen, da diese ein in sich geschlossenes, von äußeren Einflüssen unabhängiges System darstellt. Die Auswertung der Messungen ergab für den genannten Zeitraum Meßwertabweichungen unter 2 % (vgl. Abb.33). Es kann deshalb davon ausgegangen werden, daß das Spektroradiometer bei konstanten Außenbedingungen mit ausreichender Zuverlässigkeit mißt.



lx: Lux

Abb.33: Reflexionskurven gemessen gegen die mit Standardfarbe (Kodak reflectance paint) beschichtete Innenseite der Photometerkugel über einen Zeitraum von 48 Std.

4.1.1.3.2 Lage- und Größe der Meßausschnitte

Am Lehrstuhl für Biophysik wurde der zum jeweiligen Öffnungswinkel gehörige Meßausschnitt bestimmt und in eine Visiervorrichtung am Meßkopf sowie auf den Monitor übertragen (vgl. Abb.34). Für die beiden Eingangsoptiken, des Sichtbaren bzw. nahen Infrarots und des kurzwelligen Infrarots, wurde ein gemeinsamer gemittelter Meßausschnitt definiert. Dies war für Meßdistanzen von 8 - 10 m - wie sie für Geländemessungen vorgesehen waren - ausreichend, da für diese Entfernungen nur noch geringe Flächenabweichungen zwischen den Meßausschnitten der beiden Eingangsoptiken vorliegen.

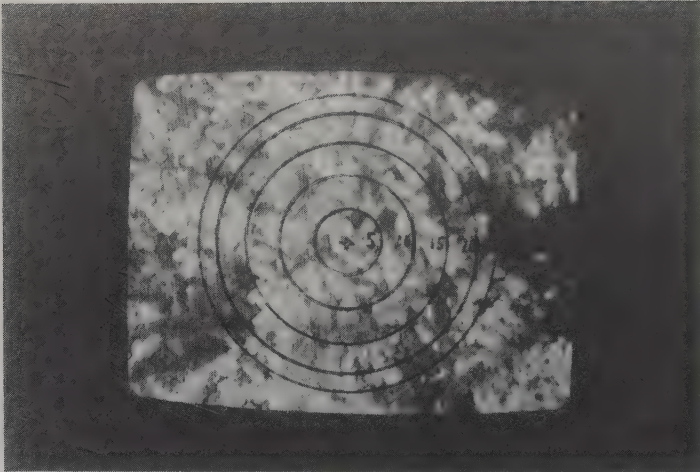


Abb.34: Gemittelter Meßausschnitt für die beiden Eingangsoptiken auf dem Monitor

Eine exakte Lagebestimmung der Meßausschnitte erwies sich allerdings für die aus nächster Nähe zum Meßobjekt durchgeführten Labormessungen als notwendig und wurde am Lehrstuhl für Landschaftstechnik durchgeführt.

Zunächst ist die Lage der optischen Achsen zueinander durch Versuchsmes-

sungen festgelegt und anschließend die Größe der Meßausschnitte, ihr Überdeckungsgrad und die als Verlustfläche bezeichnete, nicht überlappende Fläche in Abhängigkeit von Meßdistanz und Öffnungswinkel berechnet worden.

Zur Lagebestimmung der optischen Achsen wurde das Spektroradiometer in 0,5 m, 1,0 m und 1,5 m Entfernung, mit der Eingangsoptik senkrecht gegen die Wand gerichtet, aufgestellt. Der angepeilte Wandausschnitt war von einem in 5 mm Kästchen unterteilten weißen Blatt bedeckt. Im völlig abgedunkelten Raum wurde dann bei konstanter Beleuchtung ein 10 cm x 10 cm großes schwarzes Samttuch entlang der vorgezeichneten Linien in der Waagrechten und Senkrechten durch das Meßfeld geschoben. Dabei war einmal die Optik des Sichtbaren bzw. nahen Infrarots und einmal die des kurzwelligen Infrarots abgedeckt.

Die erste und letzte registrierte Meßwertveränderung wurde jeweils als Begrenzungspunkt des Meßfeldes festgelegt. Für die damit durch 4 Punkte definierte Meßfläche konnte der Mittelpunkt bestimmt werden. Die Auswertung über die drei Meßdistanzen ergab für die beiden Optiken einen parallelen Verlauf ihrer Achsen mit einer Versetzung in der Waagrechten um 10 cm.

Nach Prüfung der optischen Achsenlage wurde für jeden Öffnungswinkel die Größe der beiden Meßausschnitte mit ihrem jeweiligen Überdeckungsgrad und der Verlustfläche in Abhängigkeit von der Meßentfernung berechnet.

In Tab.6 sind die Werte für die im Labor und Gelände am häufigsten verwendeten Entfernungen mit dem Öffnungswinkel 15° angegeben. Der Öffnungswinkel 15° wurde für fast alle Messungen verwendet.

Abstand (m)	Radius (m)	Verlustfläche (m ²)	Meßfläche (m ²)	Überdeckungsgrad (%)
0,5	0,066	0,024	0,002	7,3
1,0	0,132	0,051	0,029	35,9
1,5	0,197	0,078	0,084	51,6
2,0	0,263	0,105	0,166	61,2
7,5	0,987	0,395	2,866	87,9
8,0	1,053	0,421	3,274	88,6
8,5	1,119	0,447	3,710	89,2
9,0	1,185	0,474	4,174	89,8
9,5	1,251	0,500	4,664	90,3
10,0	1,317	0,526	5,182	90,8
10,5	1,382	0,553	5,727	91,2
11,0	1,448	0,579	6,299	91,6
11,5	1,514	0,606	6,898	91,9
12,0	1,580	0,632	7,525	92,3
12,5	1,646	0,658	8,179	92,6
13,0	1,711	0,685	8,860	92,8
13,5	1,777	0,711	9,568	93,1
14,0	1,843	0,737	10,304	93,3
14,5	1,909	0,764	11,067	93,5
15,0	1,975	0,790	11,857	93,8

Tab.5: Meßausschnittgröße, Überdeckungsgrad und Verlustfläche für die häufigsten Meßdistanzen bei einem Öffnungswinkel von 15°

4.1.1.3.3 Einfluß des Öffnungswinkels auf die Meßwerte

Die am Lehrstuhl für Biophysik vorgenommenen Eichmessungen zum Einfluß des Öffnungswinkels sind mit einer punktförmigen Strahlenquelle erfolgt. Da bei einer punktförmigen Strahlenquelle mit größer werdendem Öffnungswinkel die strahlende Fläche unverändert bleibt, sind diese Versuchsbedingungen nicht auf die Meßbedingungen übertragbar, wie sie im Gelände vorliegen. Es wurden deshalb modifizierte Eichmessungen gegen die mit Stan-

ardfarbe (Kodak reflectance paint) beschichtete Metallplatte durchgeführt. Zur Vermeidung von Störeinflüssen aus der Umgebung war die Metallscheibe an einer mit schwarzem Samt ausgekleideten Wand angebracht und die Messungen erfolgten in einem völlig gegen das Tageslicht abgedunkelten Raum. Die Scheibe wurde während des Versuchs mit einer definierten Lichtquelle bestrahlt und die Meßposition konstant gehalten. Wie Abb.35 zeigt, steigt die Reflexion mit größer werdendem Öffnungswinkel, wenn sie nicht zur Einstrahlung ins Verhältnis gesetzt wird.

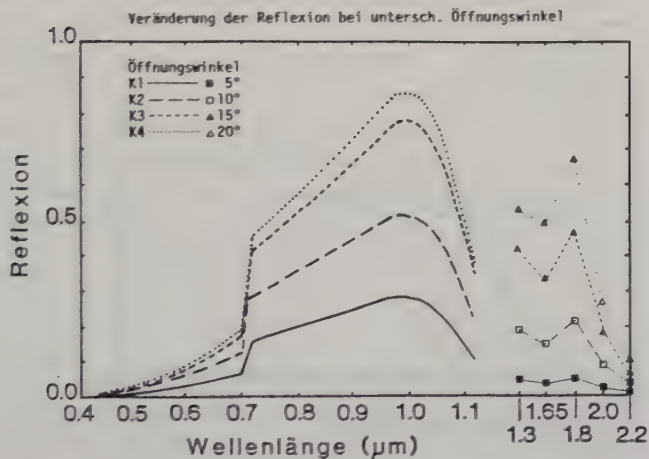


Abb.35: Reflexion (nicht verrechnet mit der Einstrahlung) für die Öffnungswinkel 5°, 10°, 15° und 20° gemessen unter Standardbedingungen

20,0°	=	100 %
15,0°	=	95 %
10,0°	=	54 %
5,0°	=	23 %

Tab. 5: Einfluß verschiedener Öffnungswinkel auf den gegen die weiße Kodakreferenzscheibe gemessenen Reflexionswert (normiert auf den Öffnungswinkel 20°)

Der Anstieg der Reflexion bei größer werdendem Öffnungswinkel ist auf die Zunahme des Anteils an reflektierender Fläche und in geringem Maße auf den steigenden Anteil des gemessenen Streulichtes zurückzuführen. Wird die Reflexion ins Verhältnis zur Einstrahlung gesetzt, so zeigen die Spektralkurven - gemessen über einer homogenen Oberfläche - nur bei einem Öffnungswinkel von 5° deutlich geringere Reflexion im Vergleich zu den Kurven, die mit größeren Öffnungswinkeln vorgenommen wurden (vgl. Abb.36).

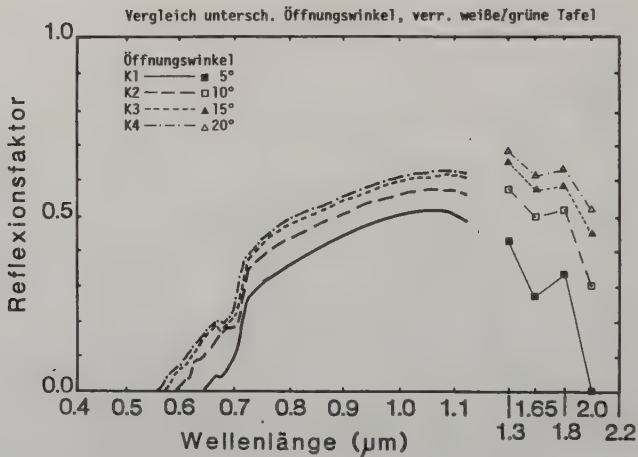


Abb.36: Reflexionsunterschiede zwischen den Öffnungswinkeln nach Verrechnung mit dem Referenzwert (Meßobjekt grüne Standardfläche)

Dieser Unterschied dürfte vorwiegend auf den verminderten Streulichtanteil zurückzuführen sein. Bei inhomogenen Meßflächen, wie sie Pflanzen bzw. Bäume darstellen, wird die Reflexion bei variierendem Öffnungswinkel nicht allein durch Veränderung des Streulichtanteils bzw. des Anteils an reflektierender Fläche modifiziert, sondern vor allem dadurch, daß mit verändertem Meßausschnitt auch Flächen mit unterschiedlichen Spektraleigenschaften erfaßt werden können. So kann z.B. die bei größtem Öffnungswinkel zusätzlich erfaßte Objektfläche in ihren Reflexionseigenschaften erheblich von der mit kleinerem Öffnungswinkel erfaßten abweichen. Die Mischsignatur, die sich für den größeren Meßausschnitt ergibt, unterscheidet sich dann

von derjenigen, die mit kleinem Meßausschnitt gemessen wird. Für vergleichende Messungen muß daher gefordert werden, daß vor Versuchsbeginn ein Öffnungswinkel festgelegt wird, mit dem ein repräsentativer Ausschnitt des Meßobjekts erfaßt werden kann.

4.1.1.3.4 Einfluß von Luftfeuchtigkeit und Lufttemperatur auf die Meßwerte

Zur Überprüfung der Geräteempfindlichkeit auf Luftfeuchtigkeits- und Temperaturunterschiede wurde in einem abgedunkelten Raum zum einen die **Lufttemperatur** auf 6°C, 22°C und 37°C bei einer Luftfeuchtigkeit von 40 % eingeregelt und zum anderen die Luftfeuchtigkeit auf 40 %, 60 % und 85 % bei möglichst konstanter Lufttemperatur (20° - 25° C) eingestellt. Meßkonstellation und Beleuchtung blieben während des Versuchs unverändert. Die Messungen wurden gegen eine grünbeschichtete Tafel ausgeführt. Die Reflexionskurven in Abb.37 zeigen keine Unterschiede für die Messungen bei 6°C und 22°C, Abweichungen ergaben sich jedoch für Messungen, die bei 37°C durchgeführt wurden.

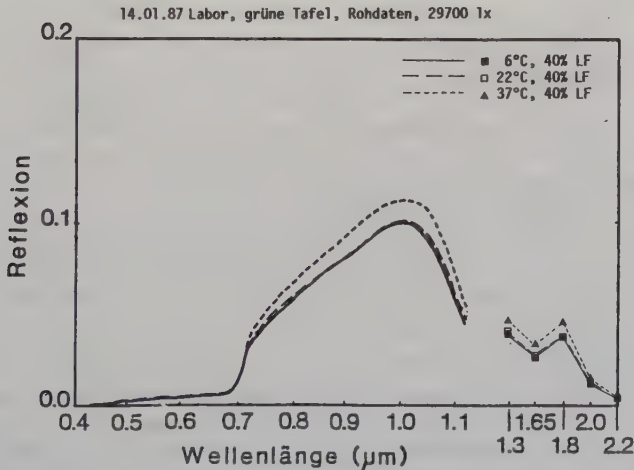


Abb.37: Reflexionskurven gemessen bei unterschiedlichen Lufttemperaturen

Wiederholt konnten für Messungen bei über 35°C Lufttemperatur erhöhte Reflexionswerte festgestellt werden. Dies ist durch die Einregelung der Si-Diode auf diese Temperatur erklärbar. Anhand des Testergebnisses kann davon ausgegangen werden, daß bei Lufttemperaturen zwischen 6°C und 35°C keine gerätespezifische Beeinflussung der Meßwerte vorliegt.

Wie Abb.38 zeigt, wurde auch für die gegen eine weiße Tafel gerichteten Messungen bei unterschiedlicher Luftfeuchtigkeit ein hohes Maß an Reproduzierbarkeit erhalten.

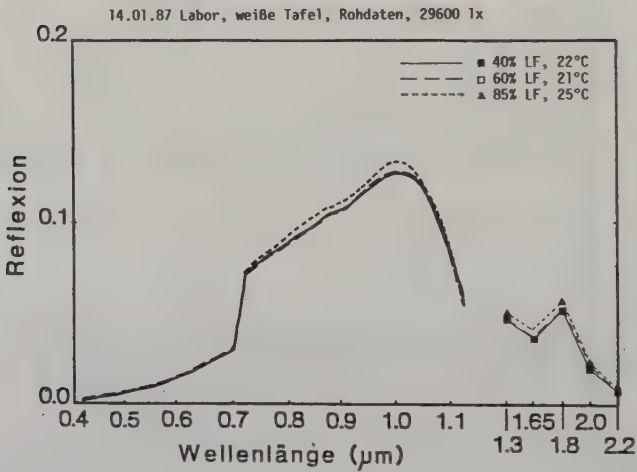


Abb.38: Reflexionskurven gemessen bei unterschiedlicher Luftfeuchtigkeit

4.2 Rahmenbedingungen zur Durchführung der Messungen im Gelände

Morphologische und physiologische Veränderungen in der Pflanze können die pflanzenpezifische Reflexion qualitativ und quantitativ beeinflussen. Diese Änderungen in der spektralen Signatur der Pflanze werden durch eine Reihe äußerer Einflußvariablen verfälscht und überlagert. Die Interpretation der Feldspektroradiometerdaten setzt daher ein sorgfältig erarbeitetes Meßkonzept voraus. Zur Festlegung der Rahmenbedingungen für die Messungen wurden deshalb neben einer intensiven Literatursauswertung (s.Kap.3.0) eigene Voruntersuchungen zur Abschätzung der Einflußparameter

- Einstrahlungs- und Beobachtungswinkel
- Wind und
- Bewölkung

auf die Meßwerte vorgenommen.

Der an sich wichtige Einflußparameter der atmosphärischen Trübung konnte bei den hier durchgeführten Reflexionsmessungen aus circa 10 m Entfernung zum Objekt vernachlässigt werden, wie die Untersuchungen von KRIEBEL (1976) zeigen.

4.2.1 Abhängigkeit der Reflexion vom Einstrahlungs- und Beobachtungswinkel

Es liegen kaum Untersuchungen vor, die sich mit der Abhängigkeit der über Waldbäumen gemessenen Reflexion von Einstrahlungs- und Beobachtungswinkel beschäftigen. Eine der wenigen Arbeiten ist die von KESSLER (1985), in der auf den Einfluß des Einstrahlungswinkels der Sonne auf die Reflexion von Kiefern hingewiesen wird. Seinen Messungen liegen jedoch jeweils nur ein Beobachtungswinkel und ein integrierter Reflexionswert zwischen $0,3 \mu\text{m}$ und $3,0 \mu\text{m}$ zugrunde. KADRO (1981) und KLEMAN (1985) beschäftigen sich hingegen in ihren Arbeiten mit dem Einfluß verschiedener Beobachtungswinkel, wobei der Einstrahlungswinkel möglichst konstant gehalten wird.

Um die Abhängigkeit der Reflexion von der **Einstrahlungs-** und der **Beobachtungsrichtung** zu erfassen, wurden deshalb im Rahmen von Voruntersuchungen eigene Messungen an Fichte durchgeführt. Gezielt sollten vor allem geringfügige Veränderungen im Winkelverhältnis zwischen Einstrahlungs- und Beobachtungsrichtung untersucht werden.

Wie die Ergebnisse von KADRO (1980) und KLEMAN (1985) zeigen, liegt bei entsprechend großer Azimutwinkeldifferenz zwischen Einstrahlungs- und Beobachtungsrichtung ein deutlicher Einfluß auf die über Wald gemessene Reflexion vor, zurückzuführen auf die für viele Waldbäume vorliegende ausgeprägte Rückwärtscharakteristik der Reflexion. Dies trifft in besonderem Maße auf Reflexionsmessungen zu, die mit großem Meßzenitwinkel über spitzkronigen Bäumen ausgeführt werden.

Es liegen bisher keine Untersuchungen zur Abschätzung des Einflusses vor, den geringfügige Veränderungen im Winkelverhältnis zwischen Einstrahlungs- und Beobachtungsazimut auf den Meßwert haben. Zur Abschätzung dieses Einflusses wurden deshalb Messungen in Mitlichtrichtung (0° Azimutwinkel) bei variierendem Sonnenazimutwinkel von 0° bis $\pm 30^\circ$, aber annähernd konstantem Sonnenzenitwinkel (SZW) vorgenommen. Die Messungen erfolgten jeweils für 0° und 45° Meßzenitwinkel (MZW) (vgl. Abb. 39).

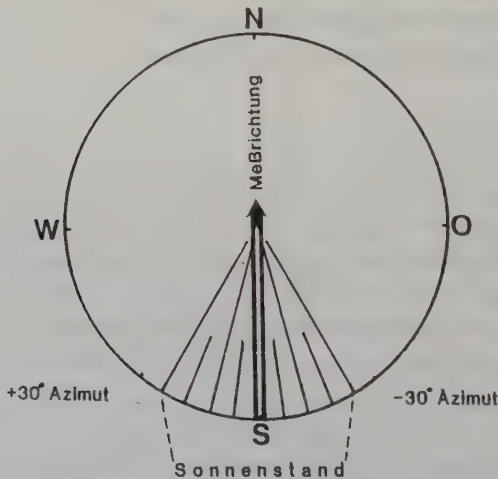


Abb.39: Meßkonstellation für die Untersuchungen zur Azimutwinkelabhängigkeit der Reflexion von Fichten

Die Auswertung der Versuche ergab bei einer Änderung des Sonnenazimuts um 59° und des Sonnenzenits um 4° für 0° MZW erhöhte Reflexionswerte für die Vormittagswerte und Nachmittagswerte im nahen Infrarot im Vergleich zu den Mittagswerten (vgl. Abb. 40).

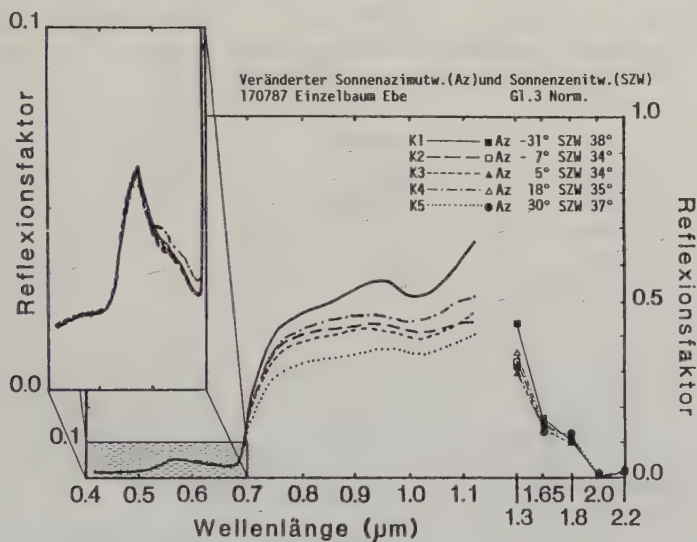


Abb.40: Reflexionskurven, gemessen über Fichte mit 0° Meßzenitwinkel, bei Veränderung des Sonnenazimutwinkels (AZ) von -31° bis $+30^\circ$ und des Sonnenzenitwinkels (SZW) von 34° bis 38°

Das Absinken der Werte ist jedoch nicht - wie zunächst angenommen - durch die Veränderung des Sonnenzenitwinkels bewirkt worden, sondern auf die unterschiedliche Beschattung innerhalb der Krone zurückzuführen. Dies geht daraus hervor, daß bei unterschiedlichem Azimut vergleichbare Reflexionsgrade an verschiedenen Baumindividuen erreicht wurden, wenn gleicher Sonnenzenitwinkel vorlag. Wiederholungsmessungen bestätigten diesen Verlauf der Reflexionskurven. Es kann deshalb davon ausgegangen werden, daß die im Vergleich zu den Mittagmessungen ($< 35^\circ$ SZW) erhöhten Reflexionswerte am Spätmittag ($40^\circ - 35^\circ$ SZW) bzw. Frühnachmittag ($40^\circ - 35^\circ$ SZW) auf die Veränderung des Sonnenzenitwinkels zurückzuführen sind, während geringe Abweichungen ($\pm 30^\circ$) im Einstrahlungsazimut kaum Einfluß auf den Meßwert

erkennen ließen. Anhand dieser Ergebnisse kann davon ausgegangen werden, daß Fichtenkronen ähnlich reflektieren wie senkrecht stehende Kegel. Wie das nachfolgende Schema in Abb. 41 zur Besonnung einer kegelförmigen Fichtenkrone verdeutlicht, wird bei einem Blickwinkel senkrecht nach unten unter dieser Annahme der Anteil der beschienenen bzw. reflektierenden Baumoberfläche fast ausschließlich vom Sonnenzenitwinkel bestimmt.

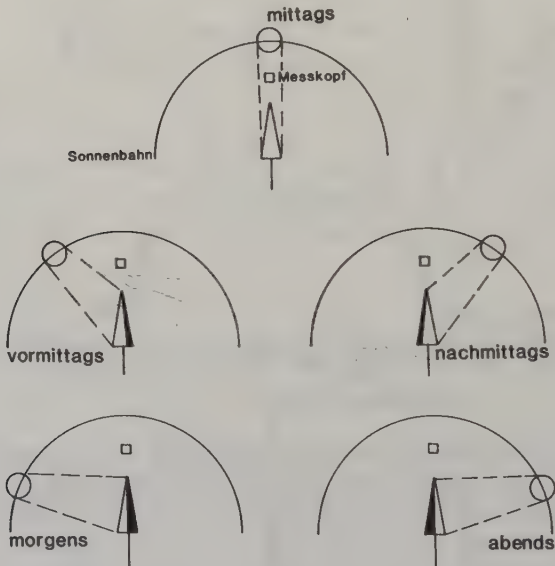
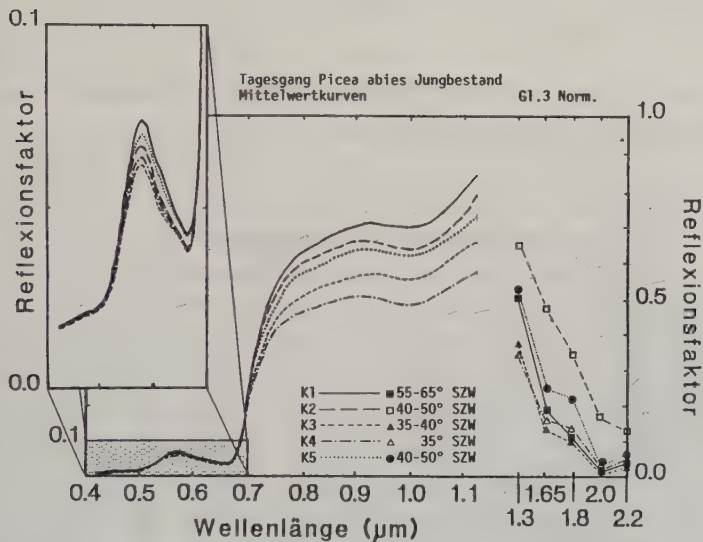


Abb. 41: Schema zur Besonnung einer kegelförmigen Fichtenkrone im Tagesgang

Um den Einfluß des Sonnenzenitwinkels auf die Baumreflexion bei 0° Meßzenitwinkel zu verdeutlichen, wurden Einzelmessungen zu Gruppen mit 65° - 55°, 50° - 40°, 40° - 35° und <35° Sonnenzenitwinkel zusammengefaßt. Der Vergleich der Mittelwerte der einzelnen Gruppen zeigte, wie anhand der vorhergehenden Azimutwinkeluntersuchungen zu erwarten war, mit kleiner werdendem Sonnenzenitwinkel eine kontinuierliche Abnahme der Reflexion im Sichtbaren und im nahen Infrarotbereich. Dieser Rückgang der Reflexion konnte jedoch im kurzwelligen Infrarotbereich nicht beobachtet

werden (vgl. Abb.42). Hier liegen die Vormittagskurven ($40^\circ - 50^\circ$ SZW) und die Nachmittagskurven ($40^\circ - 50^\circ$ SZW) deutlich über den ansonst kaum weiter differenzierten restlichen Kurven.



MITTLERE VARIANZ		Kurve Nr.				
		1	2	3	4	5
VIS	(0.4-0.7µm):	.00013	.00006	.00007	.00007	.00012
NIR	(0.7-1.13µm):	.00409	.00957	.00717	.00485	.01577
SWIR	(1.3µm):	.00323	.04858	.00238	.00837	.01712
	(1.65µm):	.00086	.14747	.00071	.00093	.00438
	(1.8µm):	.00717	.04909	.00027	.00091	.00354
	(2.0µm):	.00045	.04015	.00001	.00001	.00007
	(2.2µm):	.00075	.00871	.00000	.00012	.00022

Abb.42: Reflexionskurven gemessen über Fichte im Tagesablauf

Aus den dargelegten Ergebnissen kann geschlossen werden, daß mit zunehmendem Sonnenzenitwinkel der Anteil der in den senkrecht nach unten blickenden Sensor zurückreflektierten Strahlung zunimmt. Eine Erklärung hierfür könnte darin liegen, daß mit kleiner werdendem Sonnenzenitwinkel die einfallende Strahlung zunehmend in den Schattenlöchern zwischen den Baumkronen "verlorengeht". Diese Annahme steht im Einklang mit den Strahlungsuntersuchungen von DIRMHIRN (1964) im Bestandesinneren. In ihren Untersuchungen weist sie nach, daß der größte Anteil der Strahlung im Bestand bei kleinem Sonnenzenitwinkel gemessen werden kann. Der Anstieg im kurzwelligen Infrarot für die Vormittags- bzw. Nachmittagskurven ($40^\circ - 50^\circ$) ist schwer erklärbar, könnte jedoch auf die Schattenverteilung im Baum zurückzuführen sein.

Mit größer werdendem Meßzenitwinkel steigt theoretisch der Einfluß, den die Winkeldifferenz zwischen Beobachtungs- und Einstrahlungszimut auf die Baumreflexion hat. Trotzdem war für die Messungen mit 45° MZW - ähnlich den Senkrechtmessungen - nur ein entscheidender Einfluß des Sonnenzenitwinkels auf die Reflexion nachzuweisen.

Wie Abb.43 zeigt, konnte auch bei 45° MZW mit abnehmendem Sonnenzenitwinkel das Absinken der Reflexion beobachtet werden.

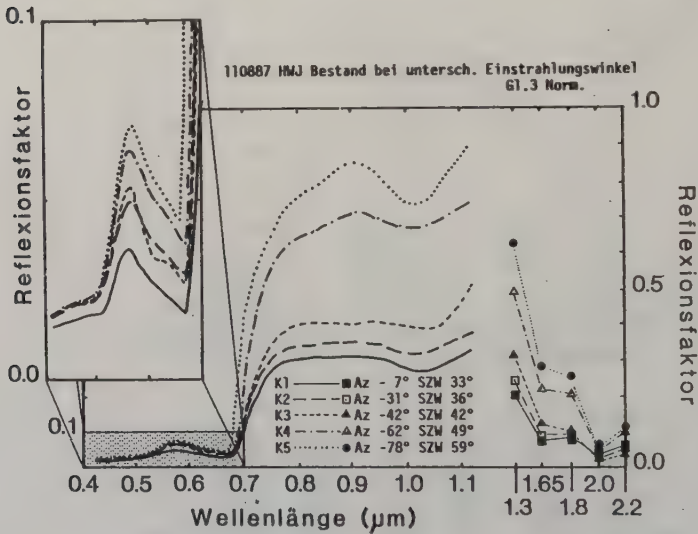


Abb.43: Reflexionskurven über Fichte, gemessen mit 45° Meßzenitwinkel, bei Veränderungen des Sonnenazimutwinkels von -78° bis -7° und des Sonnenzenitwinkels von 57° bis 31°

Ausgenommen von dieser Regel waren solche Messungen, bei denen der Meßzenitwinkel mit dem Sonnenzenitwinkel in etwa übereinstimmte. In diesem Fall konnten im Vergleich zu denjenigen Messungen, die mit mehr als 4° Abweichung zwischen Sonnenzenit- und Meßzenitwinkel durchgeführt wurden, stark erhöhte Reflexionswerte im gesamten Meßbereich registriert werden (hot spot effect).

Aus den Meßergebnissen wird deutlich, daß eine Azimutwinkeldifferenz von 30° zwischen Einstrahlungs- und Meßrichtung kaum Einfluß auf die über Fichte

ten mit 0° und 45° Meßzenitwinkel gemessenen Reflexionswerte hat, bzw. dieser durch den deutlichen Einfluß des Sonnenzenitwinkels überlagert wird.

4.2.2 Wind

Der störende Einfluß des Windes nimmt mit kleiner werdendem Meßfeld zu (HOLMES 1970) und ist bei Laubbäumen aufgrund der größeren Einzelblattflächen und fast immer geringeren Steifheit der Blätter voraussichtlich stärker als bei Koniferen. Der Einfluß der Blattbewegung auf den Meßwert wurde bei der Gerätekonstruktion in der Weise berücksichtigt, daß sofort zu jeder Messung automatisch Wiederholungsmessungen durchgeführt und die Werte miteinander verglichen werden. Erst bei dreimaliger Registrierung des gleichen Meßwertes wird dieser als der richtige Wert abgespeichert und das Filterradd bis zur nächsten Meßposition weitergefahren.

Die Erfahrungen aus den über ein Jahr dauernden Voruntersuchungen zeigten, daß sich bei Windgeschwindigkeiten über 25 km/h^* die Meßzeiten für einen Durchlauf des Spektrums erheblich verlängern. Zur Minimierung des Windinflusses auf den Meßwert wurde deshalb bei Windgeschwindigkeiten über 25 km/h nicht gemessen.

4.2.3 Bewölkung

Die durch Bewölkung verursachten Unterschiede in der Bestrahlungsstärke und in der spektralen Zusammensetzung werden durch den fast gleichzeitig zur Objektmessung erhobenen Referenzwert weitgehend berücksichtigt. Unterschiede im Reflexionsgrad ergeben sich bei Messungen über Wald jedoch auch durch die bei freier Sonneneinstrahlung unterschiedliche Ausleuchtung der Bäume im Vergleich zu derjenigen bei diffus einfallender Strahlung (bewölkter Himmel) (KESSLER 1985).

Die in Abb.44 gezeigten Reflexionskurven sind ohne Veränderung der Meßposition im Abstand von wenigen Minuten aufgenommen worden. Die Kurven

* Die Windgeschwindigkeiten wurden vor den Meßkampagnen grob durch telefonische Anfragen beim Wetteramt München ermittelt

zeigen deutlich den großen Unterschied im Reflexionswert innerhalb weniger Minuten durch veränderte Strahlungsverhältnisse, denn eine Messung wurde bei direkt einfallendem Sonnenlicht und eine Messung bei diffus einfallendem Sonnenlicht ausgeführt.

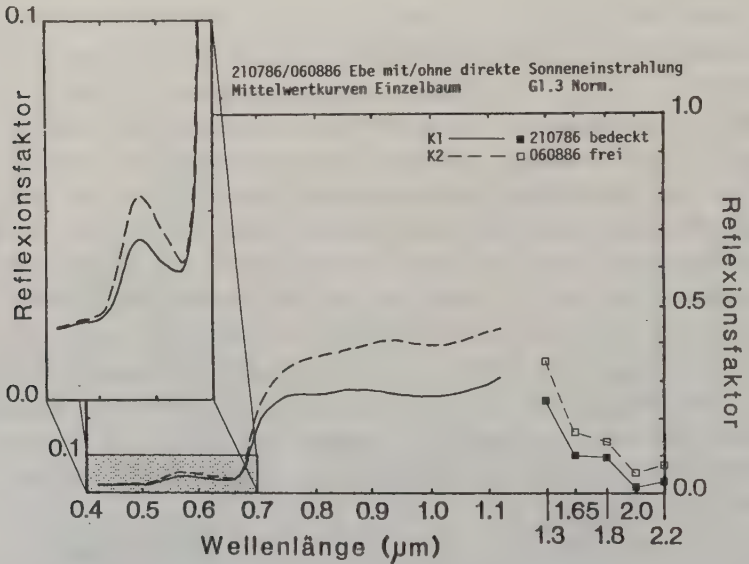


Abb.44: Reflexionskurven, gemessen bei 3/10 Bewölkung und direkt einfallendem Sonnenlicht und 3/10 Bewölkung und diffus einfallendem Sonnenlicht bei gleicher Meßsystemanordnung

Bei den Hauptuntersuchungen sind daher nur Reflexionskurven miteinander verglichen worden, die bei freier Sonneneinstrahlung und weniger als 5/10 Bewölkungsgrad gemessen wurden.

4.2.4 Meßsystemanordnung im Gelände

Auf der Grundlage der erfolgten Voruntersuchungen bzw. der ausgewerteten Literatur wurden die Rahmenbedingungen für die Messungen im Gelände wie folgt festgelegt:

- Öffnungswinkel 15°
- Referenzwerterfassung mit Kodakreferenzscheibe und Streuscheibe
- Mindestabstand zum Objekt 8 - 10 m
- Lufttemperatur während der Messungen 0°C - 35°C
- Meßzenitwinkel 0° oder 45°
- Beobachtungsrichtung Nord (Schrägmessungen)
- maximale Windgeschwindigkeit 25 km/h
- 6wöchige Meßwiederholung während der Vegetationsperiode
- Bewölkung 5/10
- freie Sonneneinstrahlung

4.3 Rahmenbedingungen zur Durchführung der Messungen im Labor

Parallel zu den Geländemessungen wurden Labormessungen an jungen Fichtenbäumchen sowie an Fichten- und Kiefernzweigen durchgeführt. Hierfür stand die in Abschnitt 4.1.1 beschriebene Labormessstation zur Verfügung. In Voruntersuchungen wurden die für Messungen in der Photometerkugel anwendbaren Methoden (vgl. von KORTÜM 1960) getestet:

- a) Das Objekt wird gerichtet beleuchtet und indirekt gemessen.
- b) Das Objekt wird indirekt beleuchtet und gerichtet gemessen.

Die Methode nach a) erwies sich als nicht durchführbar, da die Empfindlichkeit des Spektroradiometers für die Registrierung der sehr geringen Absorptionswerte der Pflanzen im nahen Infrarot nicht ausreichend war. So kam nur die Methode nach b) gezieltes Anmessen des Objektes bei indirekter Beleuchtung in Frage. Mit dieser Methode wird ebenso wie im Gelände die **Reflexion** des Objektes gemessen. Um den überprägenden Einfluß des durchschimmernden hellen Hintergrundes zu eliminieren, wurde den Probebäumchen während der Messungen ein schwarzes Tuch (größer als der erfaßte Meßausschnitt) unterlegt (vgl. Abb.45).



Abb.45: Blick in die geschlossene Photometerkugel mit Pflanze und untergelegtem schwarzem Meßtuch

Die Absorption des schwarzen Tuches ist mit dem Referenzwert berücksichtigt worden. Die Messungen wurden mit 15° Öffnungswinkeln durchgeführt, da mit diesem Öffnungswinkel der größte Teil des Baumes erfaßt wird und damit auch der Einfluß der Gesamtbiomasse auf die Reflexion eingeht.

Für die Messungen der Nadel- bzw. Zweigproben in der Photometerkugel stand der in Abb.46 abgebildete schwarz ausgekleidete Meßteller zur Verfügung.



Abb.46: Meßteller mit ausgelegten Fichtenzweigproben

Die Zweige wurden mit ihrer Oberseite zum Meßkopf hin und mit ihrer Spitze in eine Richtung dicht an dicht im Meßbehälter ausgelegt. Es wurden mehrere Zweiglagen bis zu einer Höhe von 5 cm übereinandergeschichtet. Um den Einfluß der holzigen Zweigteile auf die Reflexion abschätzen zu können, sind bei Kiefer und Fichte die Nadeln von den Zweigen entfernt und in mehreren Schichten mit der Nadeloberseite gegen das Meßgerät gerichtet ausgelegt worden. Die Messungen an Zweig- und Nadelproben sind mit 10° Öffnungs-

winkel vorgenommen worden. Für die Messungen im Labor wurden nur Kiefern- und Fichtenproben herangezogen, da sich bei eigens dazu durchgeführten Voruntersuchungen für diese Baumarten innerhalb von 44 Stunden keine Beeinflussung der Reflexion nach plötzlicher Unterbindung der Wasserzufuhr ergeben hatte.

Neben den Labormessungen mit dem Feldspektroradiometer in der Photometerkugel sind einmalig Reflexionsmessungen zur Vergilbung an Blatteilen verschiedener Laubbaumarten mit einem von der Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR) in Hannover zur Verfügung gestellten, hochauflösenden Perkin-Elmer Laborspektroradiometer, dessen technische Spezifikation der Tab.6 zu entnehmen ist, durchgeführt worden.

Wellenlängenbereich	0,4 μm - 2,5 μm
spektrale Auflösung	4 nm
Durchlaufzeit	480 nm/min.

Tab.6: Technische Spezifikation des Perkin-Elmer-Laborspektroradiometers

4.4 Datenauswertung

Grundlage jeder Weiterverarbeitung und Auswertung spektraler Information ist die spektrale Signaturanalyse, d.h. die Interpretation der über die Wellenlänge gemessenen Reflexionswerte eines Objektes. Verbindet man die in den verschiedenen Wellenlängenbereichen gemessenen Reflexionswerte miteinander, so erhält man die Reflexionskurve, auch Signaturkurve genannt.

Im Rahmen dieser Arbeit wurde versucht, neben der für die Signaturanalyse üblichen Beschreibung und Interpretation der Reflexionskurven, durch gezielte Weiterverarbeitung der Kurven die spezifischen Reflexionscharakteristiken herauszuarbeiten.

4.4.1 Aufbereitung der Daten

Die im Feld oder Labor gemessenen Daten wurden im Rechner nach Aufnahmedatum und -zeit geordnet und mit entsprechenden Zusatzinformationen abgespeichert. Neben Aufnahmedatum und -zeit sind Meßobjekt, Öffnungswinkel, Meßzenitwinkel, Höhe über Grund, Bewölkungsgrad, Beleuchtungsstärke sowie Besonderheiten - z.B. Bodenanteil im Meßausschnitt, Beschattung, böige Winde, Schädigungsgrad - erfaßt worden.

Jeder Messung wurde mit Hilfe eines Programms von ENDERS (1985) ein halbstündlich errechneter Sonnenazimut und Sonnenzenit zugeordnet. Zur ersten Vorsortierung und Bewertung der Daten erfolgte für alle Messungen die Anfertigung von Einzelsignaturkurven, sogenannten "Quicklooks".

Nach der Errechnung des Reflexionsfaktors wurden die Reflexionskurven entsprechend den zu untersuchenden Zielparametern in Datenblöcke zusammengefaßt und dargestellt.

4.4.2 Normierung der Reflexionskurven

Die Verfälschung der über Pflanzen gemessenen Reflexion durch Einflußfaktoren, die nicht auf die Pflanze zurückzuführen sind, wurde schon bald als Problem für die Auswertung erkannt. Die häufigsten verfälschenden Einflüsse waren

- Fehler bei der Referenzwerterfassung,
- durchscheinender Untergrund und
- Spiegeleffekte.

Während die Verfälschung der Reflexionskurven durch Spiegeleffekte nur über die Aussortierung der fehlerhaften Kurven behoben werden konnte, wurden Verfälschungen, die auf den Referenzwert (vgl. Abschn. 3.2.2.2) bzw. auf den Einfluß des Objekthintergrundes zurückzuführen waren, mit Hilfe einer Normierung der Kurven ausgeglichen. Am deutlichsten wirkten sich die durch die Expositionsabweichung zwischen der Baumoberfläche und der horizontal ausgerichteten Referenzfläche verursachten Fehler auf die Meßwerte aus. Dies ist darauf zurückzuführen, daß in Abhängigkeit vom Grad der Expositionsabweichung zwischen Referenzoberfläche und Baumoberfläche und vom Einstrahlungswinkel der Sonne die Intensität und spektrale Zusammensetzung der Zustrahlung auf Referenz- und Objektfläche zum gleichen Zeitpunkt erheblich voneinander abweichen kann. Bei der spitzkronigen Fichte führte dies zu einer Verfälschung des Reflexionsfaktors in der Weise, daß bei geringer werdendem Sonnenstand auf der Referenzfläche im Vergleich zur Baumoberfläche die Einstrahlungsintensität abnahm und die kürzeren Wellenlängen stärker hervortraten. Der Referenzwert war damit nicht mehr repräsentativ für die auf die Baumoberfläche auftreffende Strahlung. Außerdem ergaben sich für die Kodakreferenzscheibe leichte Ungenauigkeiten im Referenzwert durch nicht erkennbare Verkippen der Scheibe aus der Horizontallage.

Die Abweichungen in der spektralen Zusammensetzung der Zustrahlung konnten vernachlässigt werden, da keine Messungen bei tiefstehender Sonne in die Auswertung einbezogen wurden. Um Verfälschungen durch unterschiedliche Zustrahlungsintensitäten auszugleichen, sowie den Einfluß des Objektuntergrundes zu reduzieren, wurden alle Reflexionskurven nach ihrer Verrechnung der schon genannten Normierung unterzogen. Für die Normierung wurde der Reflexionsfaktor im Wellenlängenbereich $0,43 \mu\text{m}$ auf $0,02^*$ gesetzt. Die rest-

* $0,02$ entspricht in etwa dem natürlichen durchschnittlichen Reflexionsgrad bzw. -faktor über Nadelwald.

lichen 54 Reflexionswerte wurden mit dem bei $0,43 \mu\text{m}$ errechneten Faktor aus gemessenem Reflexionsfaktor und neuem Standardreflexionsfaktor (0,02) multipliziert. Diese Korrektur ist unter der Voraussetzung zulässig, **daß auch gering reflektierende Flächen als Referenzstandard erlaubt sind und der Reflexionswert bei $0,43 \mu\text{m}$ für alle untersuchten Bäume annähernd gleich ist.** Die Verwendung dunkler Flächen als Referenz ist nach v. KORTÜM (1960) erlaubt, die Eignung des Wellenlängenbereichs $0,43 \mu\text{m}$ für eine Normierung der Reflexionskurven von Pflanzen ist bisher noch nicht untersucht. Da auch Empfehlungen für andere Wellenlängenbereiche fehlen, wurde nach einer umfassenden Analyse der in der Literatur vorliegenden Reflexionskurven von Pflanzen eine Normierung im Wellenlängenbereich $0,43 \mu\text{m}$ aus folgenden Gründen festgelegt:

- Die Absorptionsbanden Chlorophyll a/b, -Carotin und Xanthophyll haben ihren Schwerpunkt um den Wellenlängenbereich $0,4 \mu\text{m}$ (s.Tab.1), die auftreffende Strahlung wird daher in diesem Teil des Spektrums nur zu einem sehr geringen Anteil von der Pflanze reflektiert und die Reflexion ist folglich in diesem Bereich nicht stark differenziert.
- Die in der Literatur präsentierten Reflexionskurven zeigen bei $0,43 \mu\text{m}$ trotz variierender pflanzenspezifischer Parameter allenfalls geringe, in vielen Fällen keine Unterschiede im Reflexionswert (vgl. Abbn. 47, 48, 49).

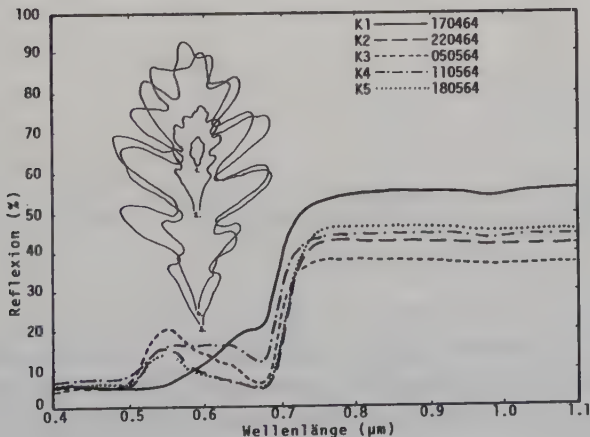


Abb.47: Reflexion eines Eichenblattes in verschiedenen phänologischen Entwicklungsstadien (nach GATES 1970)

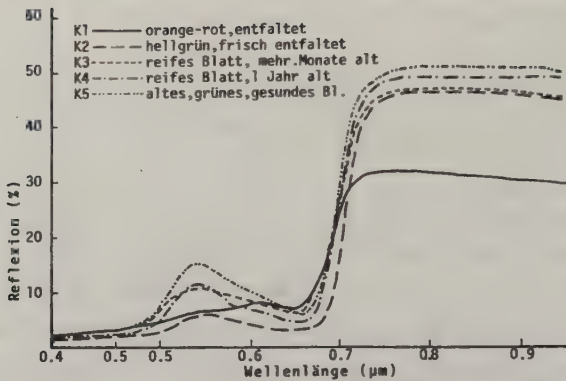


Abb.48: Reflexion von Eucalyptusblättern (*Eucalyptus goniocalyx*) mit unterschiedlicher Pigmentierung (nach HOWARD 1971)

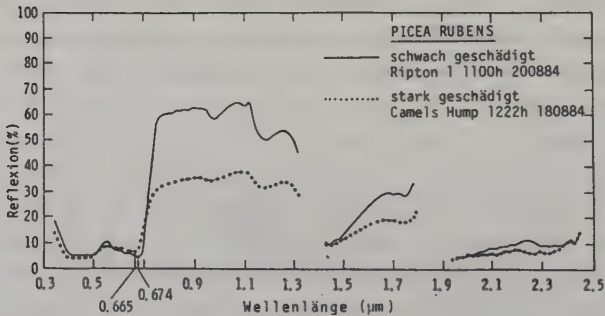


Abb.49: Reflexion von Fichtennadeln (*Picea rubens*) gesunder und kranker Bäume (nach ROCK et al. 1985)

- Eigene Messungen im Wellenlängenbereich $0,4 \mu\text{m}$ - $2,5 \mu\text{m}$ zeigten ebenfalls bei $0,43 \mu\text{m}$ kaum Unterschiede zwischen den Reflexionswerten verschiedener Arten von Laubblättern bzw. Nadeln (vgl. Abb.50).

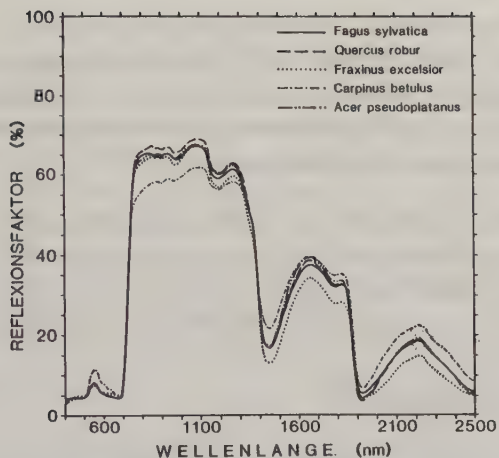


Abb. 50a: Reflexionskurven verschiedener Arten von Laubblättern (Oberseite)

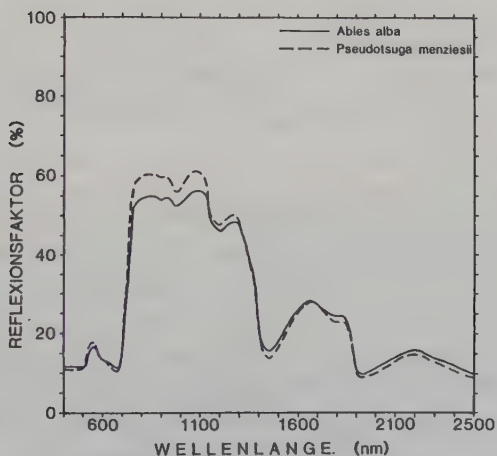


Abb. 50b: Reflexionskurven von Tanne (*Abies alba*) und Douglasie (*Pseudotsuga menziesii*) (Oberseite)

Größere Abweichungen in der Reflexion (bis zu 5 %) bei $0,43 \mu\text{m}$ konnten nur bei deutlichen Unterschieden in der Wachsauflage beobachtet werden. Eine Beeinflussung der Reflexion bei $0,43 \mu\text{m}$ dürfte auch durch Blattbehaarung oder bei erheblichen Unterschieden in der Blattfarbe möglich sein, wie die Messungen von ELLER (1979) zeigen.

Anhand dieser Ergebnisse kann davon ausgegangen werden, daß die für die Pflanze charakteristischen Reflexionsunterschiede auch nach einer Normierung im Wellenlängenbereich $0,43 \mu\text{m}$ erhalten bleiben, wenn nicht deutliche Unterschiede in der Wachsauflage, Blattbehaarung oder Blattfarbe vorliegen.

4.4.3 Mittelwertkurve

Durch die schwierigen Meßbedingungen im Gelände konnten - bei der Auswertung nach bestimmten Einflußparametern - oft nur wenige Messungen in eine Klasse zusammengefaßt werden. Durch den geringen Stichprobenumfang der Klassen (6-10 Einzelmessungen) und die Vielzahl der Einflußfaktoren, die für jede Klasse berücksichtigt werden mußten, hätte eine umfassende statistische Auswertung der Daten nach PRUSHA (1987) keinen zusätzlichen Informationsgewinn erbracht. Es wurde deshalb auf eine aufwendige statistische Auswertung verzichtet und nur das arithmetische Mittel mit der jeweiligen Varianz einbezogen.

Der Mittelwert und die jeweilige Varianz wurde für jeden Aufnahmebereich gesondert errechnet. Die Darstellung der Varianz erfolgt tabellarisch, wobei in den Tabellen die Varianz für den sichtbaren Wellenlängenbereich und ebenso für den nahen Infrarotbereich jeweils zu einem mittleren Wert zusammengefaßt wurde. Dies war möglich, da sich die einzelnen Varianzwerte innerhalb des Sichtbaren bzw. innerhalb des nahen Infrarots kaum unterscheiden. Die Auflistung der 55 einzelnen Varianzwerte hätte durch die Vielzahl der Werte zur unübersichtlichen Darstellung geführt.

4.4.4 Bildung der Minima und Maxima

Unterschiede in den Signaturkurven können durch die Darstellung der Minima und Maxima zusätzlich verdeutlicht werden. Um die für die qualitativen und quantitativen Unterschiede in der Baum- bzw. Blattreflexion signifikanten Minima und Maxima herauszuarbeiten, wurden anhand einer vorausgehenden Signaturanalyse folgende Wellenlängenabschnitte festgelegt:

Abschnitt 1:	0,55 μm - 0,66 μm
Abschnitt 2:	0,90 μm - 1,0 μm

Abschnitt 1 wurde gewählt, weil sich in diesem Wellenlängenbereich mögliche Verschiebungen des Reflexionsmaximums im Grünen bzw. des Reflexionsminimums im Roten beobachten lassen.

In Abschnitt 2 sollten eventuelle Veränderungen der Wasserabsorptionsbanden (um 0,9 μm) im nahen Infrarot erfaßt werden.

4.4.5 Bildung der Quotienten

Unterscheidungsmerkmale zwischen den Kurven können durch Quotienten verdeutlicht werden, wenn die Differenz zwischen den Werten aus zwei bestimmten Kanälen innerhalb einer Reflexionskurve verhältnismäßig größer bzw. kleiner ist als die Differenz aus den selben Kanälen in der Vergleichskurve. Bei entsprechender Kanalwahl eignet sich der Quotient auch als Vitalitätsanzeiger (HORLER 1983). Es wurden deshalb entsprechend dem bisherigen Kenntnisstand und anhand eigener Signaturanalysen Quotienten festgelegt, die erwarten lassen, daß Veränderungen in der Reflexion durch Pigmentierung, Zellstruktur oder Wassergehalt durch sie verdeutlicht werden können. So werden durch den Quotienten 660 nm/570 nm Hinweise auf Pigmentveränderungen erwartet, durch die Quotienten 660 nm/820 nm und 1650 nm/1100 nm sollen Veränderungen in der Zellstruktur der Blattorgane, aber auch der Einfluß durch Schatten und Objekthintergrund angezeigt werden und der Quotient 1650 nm/1800 nm könnte entsprechend den Untersuchungen von MYERS (1970) und TUCKER (1980) Unterschiede im Wassergehalt der Pflanzen verdeutlichen. Dabei wurden die Quotienten - mit Ausnahme des Quotienten 660 nm/570 nm - so zueinander ins Verhältnis gesetzt, daß entsprechend der bisherigen Kenntnisse ein großer Quotient auf geringe Vitalität hinweisen könnte. Der Quotient 660 nm/570 nm ist ein Anzeiger für Pigmentveränderungen, wie sie sowohl für gesunde als auch kranke Nadeln vorliegen können und ist deshalb nicht ohne weiteres als Vitalitätsanzeiger zu betrachten. Der Quotient 1650 nm/1800 nm wurde nur für die Trockenstreßuntersuchungen in die Auswertung einbezogen.

4.5 Beschreibung der Testflächen

Die Auswahl der Testflächen erfolgte unter dem Gesichtspunkt einer **möglichst starken Differenzierung nach Alter, Schädigung und Flächenbehandlung**, bei gleichzeitig hoher Homogenität innerhalb der einzelnen Testflächen.

Ein weiterer Gesichtspunkt bei der Auswahl der Testflächen war die Einbindung der Flächen in andere Forschungsvorhaben, um damit ein Höchstangebot an spezifischer Information zu gewinnen, aber auch um die Ergebnisse unserer Messungen in die anderen Projekte einfließen zu lassen.

Da von uns nur Einzelbäume auf den Versuchsflächen angemessen wurden, kann nachfolgend auf die Beschreibung der Größe und Bestockungsdichte der Versuchsflächen verzichtet werden.

4.5.1 Ebersberger Forst

Der Ebersberger Forst - östlich von München gelegen - ist durch einheitlich strukturierte Fichtenbestände gekennzeichnet. Neben den dort seit Beginn der achtziger Jahre auftretenden neuartigen Waldschäden wiesen die Bestände aufgrund eines schweren Hagels im Sommer 1984 zusätzliche Verluste an grüner Nadelmasse, sowie Stammschäden auf.

Es war deshalb naheliegend, hier Spektroradiometermessungen zur Erfassung von Baumschäden vorzunehmen. Es bot sich dafür die Versuchsfläche des Lehrstuhls für Bioklimatologie und Angewandte Meteorologie der Universität München mit dem dort installierten Stahlurm als Meßplattform an (vgl. Abb.51). Bei Versuchsbeginn 1985 waren die ausgewählten Meßbäume auf dieser Fläche durch deutliche Nadelmassenverluste (40 - 50 %) und leichte Vergilbungen (10 - 20 %) gekennzeichnet. Schon während der Vegetationsperiode 1986 und verstärkt 1987 trat eine deutliche Besserung im Vitalitätszustand der Bäume ein. Im Meßjahr 1987 konnten keine Vergilbungen mehr beobachtet werden und der Nadelverlust sank auf durchschnittlich 30 %. Die detaillierte Beschreibung der Versuchsfläche ist der nachfolgenden Tab. 7 zu entnehmen.

Allgemeine Bestandeskenngrößen

Waldgebiet: Ebersberger Forst
Oberforstdirektion: München
Forstamt: Ebersberg
Waldabteilung: XIV/27 Exposition: Ebene

Bestandeskenngrößen

Baumart: Fichte Alter: 90jährig
Schädigungsart: Hagel, neuartige Waldschäden
Schädigungsgrad: 1985 - 2,45
 1987 - 2,00

Mittlere Bestandeshöhe: 32 m

Bodenbewuchs in Flächenprozent (geschätzt): 60 %

Meßanordnung

Meßträger: Stahlturm
Meßkopfhöhe über Grund: 40 m
Zielparameter: Jahresgang, Schädigung, Alter

Tab.7: Bestandesbeschreibung Ebersberger Forst

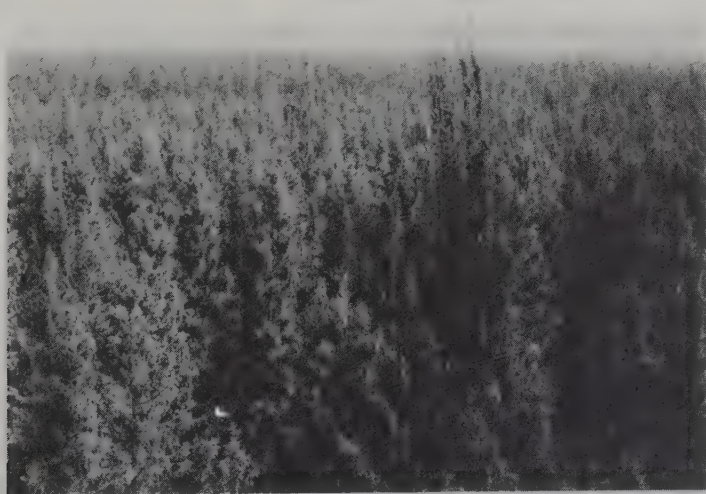


Abb.51: Versuchsfläche Ebersberger Forst
vom Stahlturm aus aufgenommen

4.5.2 Höglwald

Der im Nordwesten Münchens gelegene Höglwald ist Versuchsstandort des Lehrstuhls für Bodenkunde und Pflanzenernährung der Universität München für saure Beregnungs- (H_2SO_4 angereichertes Wasser) und Kalkungsexperimente (Dolomit). Die Versuchsparzellen befinden sich in einem einheitlich strukturierten Fichtenaltbestand (78 J) sowie einem Fichtenjungbestand (15 J). Die Anzahl und Verteilung der Parzellen in den beiden Fichtenbeständen mit den jeweiligen Behandlungsvarianten ist der Abb.52 zu entnehmen.

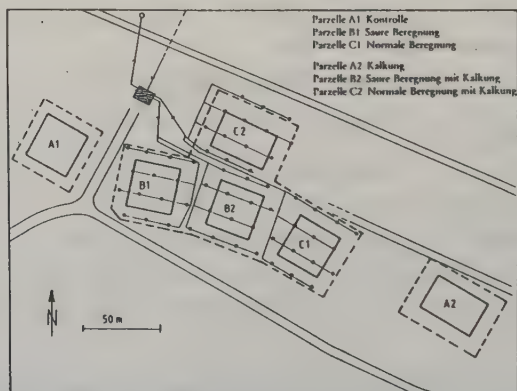


Abb.52: Lageplan und Behandlungsvarianten der Versuchsparzellen Höglwald (nach Kreutzer et al. 1986)

4.5.2.1 Altbestand im Höglwald

Der Altbestand im Höglwald ist ein in seiner Alters- und Bestandesstruktur der Versuchsfläche im Ebersberger Forst vergleichbarer Fichtenreinbestand. Zum Zeitpunkt der Testflächenauswahl (Herbst 1984) waren die Höglwaldflächen als gesund eingestuft worden (MASCHNING 1986). Die nichtbehandelte Parzelle A1 (vgl. Abb.52) wurde deshalb als gesunde Referenzfläche zur Schadfläche im Ebersberger Forst ausgewiesen. Nachdem die Fläche ausgewiesen war, wurde der Bestand im Sommer 1985 und verstärkt im Sommer 1986 von der Fichtenblattwespe befallen. Das Auftreten dieses Schädling führte zu massivem Nadelfraß im oberen Kronenbereich des Fichtenaltbestandes. Durch

diese Entwicklung der Schädigung des Bestandes im Höglwald durch die Fichtenblattwespe - bei gleichzeitiger Erholung der Bäume im Ebersberger Forst - war eine Differenzierung der beiden Flächen nach dem Schädigungsgrad kaum mehr möglich.

Gemessen wurden im Altbestand des Höglwaldes zwei Parzellen - A1 ohne Behandlung (vgl. Abb.53) - und B1 mit saurerer Beregnung. Weitere Parzellen konnten nicht in die Messungen einbezogen werden, da mit dem als Meßplattform zur Verfügung stehenden Kranwagen nur die direkt an die Forststraße angrenzenden Parzellen erreicht wurden. Die detaillierte Bestandesbeschreibung ist in Tab. 8 dargestellt.

Allgemeine Bestandeskenngrößen

Waldgebiet:	Höglwald	
Oberforstdirektion:	Augsburg	
Forstamt:	Aichach	
Waldabteilung:	Otterwiese	Exposition:
		Plateaulage

Bestandeskenngrößen

Baumart:	Fichte 96 %, Buche 2 %, Kiefer 2 %	
Alter:	78 Jahre	
Schädigungsart:	Fichtenblattwespe	
Schädigungsgrad:	1983 -	2,0
	1987 -	1,9
Mittlere Bestandeshöhe:	31 m	
Bodenbewuchs in Flächenprozent (geschätzt):	10 %	

Meßanordnung

Meßträger:	Kranwagen (50 m Leiterhöhe)
Meßkopfhöhe über Grund:	45 m
Zielparameter:	Jahresgang, Schädigung, Alter

Tab.8: Bestandesbeschreibung des Fichtenaltbestandes im Höglwald



Abb.53: Fichtenaltbestand im Höglwald
(Blick auf Parzelle A1)

4.5.2.2 Jungbestand im Höglwald

Der Jungbestand im Höglwald war 1986 (RÖHLE) als nicht geschädigt ausgewiesen. Diese Versuchsfläche diente deshalb für Reflexionsmessungen an gesunden Jungbäumen (vgl. Abb. 54). Die ausgezeichnete Vitalität dieses Jungbestandes war an überdurchschnittlichen Zuwächsen (RÖHLE 1986) und auch äußerlich an der vitalen grünen Färbung der Nadeln gut erkennbar. Die Messungen über dem Fichtenjungbestand wurden von einem Kranwagen aus durchgeführt. Die ursprünglich geplanten Behandlungsvarianten konnten aus technischen Gründen vom Lehrstuhl für Bodenkunde nicht durchgeführt werden, so daß eine Beeinflussung des Bestandes durch Beregnungsmaßnahmen nicht gegeben war.

Die Bestandesparameter sind in Tab.9 nachgewiesen.

Allgemeine Bestandeskenngrößen

Waldgebiet: Höglwald
Oberforstdirektion: Augsburg
Forstamt: Aichach
Waldabteilung: Lindlschlag Exposition: Senke

Bestandeskenngrößen

Baumart: Fichte 98 %, Laubholz 2 %
Alter: 15 Jahre
Schädigungsart: Krümmung bei neuen Terminaltrieben
Schädigungsgrad: 0
Mittlere Bestandeshöhe: 8 m
Bodenbewuchs in Flächenprozent (geschätzt): 10 %

Meßanordnung

Meßträger: Kranwagen (maximale Korbhöhe 35 m)
Meßkopfhöhe über Grund: 20 m
Zielparameter: Jahresgang, Alter, Vitalität

Tab. 9: Bestandesbeschreibung des Fichten-Jungbestandes
im Höglwald



Abb.54: Versuchsfläche im Fichten-Jungbestand
des Höglwalds

4.5.2.3 Buche im Höglwald

Zusätzlich zu den Messungen über Fichte sind im Höglwald Einzelbaummessungen an Buchenrandbäumen vorgenommen worden. Die beiden ausgewählten 80jährigen Buchen (vgl. Abb.55) unterschieden sich deutlich in ihrer Belaubungsdichte und Verzweigung. Während der eine Baum voll belaubt war und keine Verzweigungsanomalien aufwies, war der zweite Baum durch 25 % Blattverlust und spießartige Seitenzweige gekennzeichnet.

Die Bestimmung des Blattverlustes erfolgte nach BOSSHARD (1986). Bei beiden Bäumen konnten keine Vergilbungen beobachtet werden, jedoch traten im Frühherbst (Mitte September) verstärkt Blattnekrosen auf.

Zielparameter bei diesen Untersuchungen waren Reflexionsmessungen zum Jahresgang und zum Blattverlust.

Die allgemeinen Bestandesparameter entsprechen den in Tab.8 dargestellten.

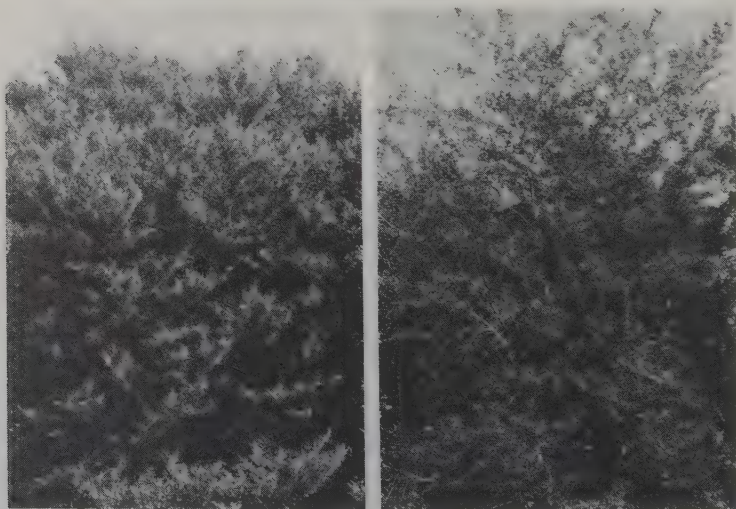


Abb.55: Die für Reflexionsmessungen ausgewählten Buchen (*Fagus sylvatica*); Oktober 1987

4.5.3 Untere Isarauen

In den Unteren Isarauen - nördlich von München - wurde ein Fichtenreinbestand (vgl. Abb.46) ausgewählt, der durch starke Vergilbungen an mehrjährigen Nadeln und durch deutlichen Nadelverlust gekennzeichnet war. Er sollte im Vergleich zum Fichtenjungbestand im Höglwald als geschädigter Referenzbestand dienen. Die Vergilbungen traten ganzjährig auf, waren im Frühjahr jedoch besonders deutlich ausgeprägt. Neben dem auf den Kiesstandorten der Isarauen häufig auftretenden Mn-Mangel bei Pflanzen könnte möglicherweise eine erhöhte Belastung der Luft im Münchener Nordosten durch vorherrschende West- und Südwestwinde zu einer zusätzlichen Schädigung des Bestandes geführt haben (Lufthygienische Lage in München 1974 - 1981).

Die Bestandesparameter sind in Tab.10 beschrieben.

Allgemeine Bestandeskenngößen

Waldgebiet: Untere Isarauen
Oberforstdirektion: München
Forstamt: München
Waldabteilung: Bachmündung Exposition: Ebene

Bestandeskenngößen

Baumart: Fichte 98 %, Laubholz 2 %
Alter: 18 Jahre
Schädigungsart: Starke Vergilbungen, Nadelverlust,
abgestorbene Zweigteile
Schädigungsgrad: 1986 - 2.7
Mittlere Bestandeshöhe: 7 m
Bodenbewuchs in Flächenprozent (geschätzt): 25 %

Meßanordnung

Meßträger: Kranwagen (maximale Korbhöhe 35 m)
Meßkopfhöhe über Grund: 20 m
Zielparameter: Jahresgang, Vitalität, Tagesgang

Tab.10: Bestandesbeschreibung der Versuchsfläche
Untere Isarauen



Abb.56: Versuchsfläche Untere Isarauen

4.6 Beschreibung der Versuche

Die Versuche zur Charakterisierung der Reflexion von Waldbäumen erfolgten **sowohl im Labor als auch im Gelände**. Dies war erforderlich, da nur über den Vergleich der Labor- mit den Geländemeßergebnissen eine Abschätzung erfolgen konnte, inwieweit die im Gelände über den Baumkronen gemessene Reflexion pflanzenspezifisch ist bzw. durch äußere Einflußparameter hervorgerufen wird.

4.6.1 Untersuchungen zur Kronenreflexion bei Blatt- bzw. Nadelverlust

Wie in Kap. 3.2.1.4 dargelegt, hat die Belaubungsdichte eines Baumes entscheidenden Einfluß auf die über der Krone gemessene Reflexion.

Zur Klärung der Frage, welche qualitativen Veränderungen in der Baumreflexion durch Blattverlust bewirkt werden und inwieweit diese Veränderungen auf den Einfluß der Kronenstruktur bzw. des Baumuntergrundes oder auf blattspezifische, mit der Entnadelung einhergehende Krankheitssymptome zurückgeführt werden können, wurden intensive Labor- und Geländemessungen vorgenommen.

Messungen zum Einfluß der Blatt- bzw. Nadelverluste auf die Reflexion in Abhängigkeit vom Baumuntergrund wurden im **Labor** an Fichtenbäumchen durchgeführt. Um zu verdeutlichen, wie stark der Untergrund auf die über Fichtenbäumchen gemessene Reflexion einwirken kann, erfolgten zunächst Messungen an Fichtenbäumchen mit dunklem und hellem Untergrund.

Für die Messungen wurden sowohl buschig, als auch verlichtet wirkende Bäumchen verwendet (vgl. Abb.57).

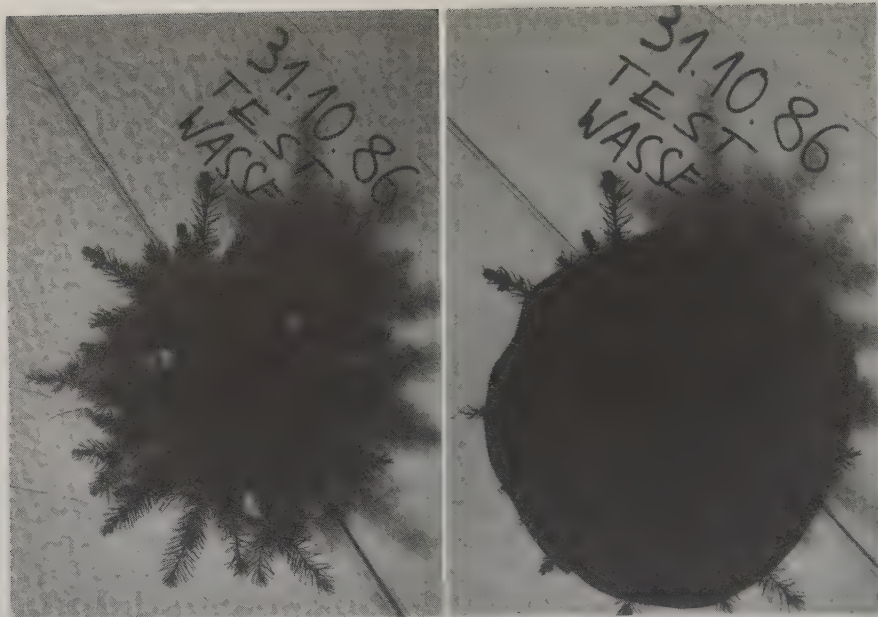


Abb.57: Buschig wirkendes Fichtenbäumchen
in der Photometerkugel vor hellem
und dunklem Untergrund

Im Anschluß an diese Messungen wurden - zur Simulation eines fortschreitenden Verlustes an grüner Nadelmasse - 6jährige Fichtenbäumchen stufenweise vom Boden zur Kronenspitze hin entastet (vgl. Abb.58). Vor jeder Astentnahme ist die Reflexion der Bäumchen durch Messungen senkrecht nach unten in Kronenaufsicht erfaßt, sowie das Frischgewicht des entnommenen Astmaterials bestimmt und ins Verhältnis zum Gesamtgewicht gesetzt worden.

Da in dichten Waldbeständen der Boden meist unbewachsen ist und deshalb dunkel wirkt, wurde während dieser Messungen der Untergrund dunkel gehalten.



Abb.58: Versuchsbäumchen vor, während und nach der Entastung

Da für die Reflexionsmessungen zum Nadelverlust im **Gelände** keine geeigneten Fichtenflächen zur Verfügung standen, wurden diese an Kiefern (Versuchsfläche des Lehrstuhls für Waldwachstumskunde der Universität München) durchgeführt. Die gleichaltrigen Kiefern (70 Jahre) unterschieden sich deutlich im Entnadelungsgrad, Vergilbungen konnten jedoch nicht bzw. nur vereinzelt beobachtet werden. Die Ansprache des Entnadelungsgrades der Versuchsbäume erfolgte durch Mitarbeiter des Lehrstuhls für Waldwachstumskunde in 10-%-Stufen.

Für die Auswertung der Reflexionsmessungen wurden die Einzelkurven zu Gruppen von

- 0 - 20 %
- 40 - 60 % und
- 70 - 80 %

Entnadelung zusammengefaßt (vgl. Abb.59):



Abb.59: Unterschiedlich stark entnadelte Kiefern

Für jede Gruppe ist eine Mittelwertkurve gebildet worden, wobei auf vergleichbare Einstrahlungsverhältnisse geachtet wurde. Die Messungen erfolgten mit 0° MZW senkrecht über der Kronenspitze. Der Boden war zum Zeitpunkt der Messungen unbewachsen und wirkte dunkel.

Zusätzlich zu den Messungen über Kiefer wurden Reflexionsmessungen zum Blattverlust auch an Buche durchgeführt. Eine Beschreibung der Testbäume liegt in Abschn. 4.5.2.3 vor. Die Reflexionsmessungen erfolgten wie bei Kiefer 8 m über der Krone, mit 0° MZW senkrecht nach unten.

4.6.2 Untersuchungen zur Reflexion der Waldbäume im Jahresrhythmus

Für die Untersuchungen zur Beeinflussung der Reflexion im Ablauf der Vegetationsperiode wurden parallel zu den Geländemessungen Vergleichsmessungen an Topffichten im **Labor** durchgeführt. Die Topffichten waren während des gesamten Untersuchungszeitraums Freilandbedingungen und damit dem gleichen Vegetationsrhythmus ausgesetzt wie die Bäume im Gelände. Die Messungen selbst wurden in der Photometerkugel unter Standardbedingungen vorgenommen.

Im **Gelände** erfolgten die Messungen zum Jahresgang über zwei Vegetationsperioden hinweg von April bis September an Fichte und Buche. Während an Buche nur Einzelbaummessungen mit 0° MZW vorgenommen worden sind, liegen für Fichte sowohl Einzelbaummessungen mit 0° , als auch Bestandesmessungen mit 45° MZW vor.

Wie anhand der Voruntersuchungen dargelegt (vgl. Kap. 4.2), hat der SZW starken Einfluß auf die über dem Bestand gemessene Reflexion. Es wurden deshalb für die Jahresgangsmessungen zwei voneinander unabhängige Auswertungen nach

- gleicher Tageszeit und
- gleichem Sonnenzenitwinkel

durchgeführt.

Die Einzelmessungen wurden dabei zu drei im Jahresablauf typischen Entwicklungsphasen zusammengefaßt:

- Vor Beginn der Wachstumsperiode (März/April)
- Während der Wachstumsperiode (Juni/Juli)
- Nach Abschluß der Wachstumsperiode (August/September)

Für jede Entwicklungsphase wurde aus den Einzelmessungen ein Mittelwert gebildet, wobei in diesen - zu etwa gleichen Teilen - Messungen an Jung- und Altbeständen eingingen.

Eine Ausnahme bildeten die Untersuchungen zum Jahresgang der Reflexion bei Buche, da für diese Messungen nur zwei gleichaltrige Buchen zur Verfügung standen.

Bei den mit 45° MZW vorgenommenen Reflexionsmessungen wurden zur Vermeidung des hot spots Effekts keine Einzelmessungen mit weniger als 4° Winkeldifferenz zwischen Sonnen- und Meßzenitwinkel in die Auswertung einbezogen.

4.6.3 Untersuchungen zur Reflexion bei Blatt- und Nadelvergilbung

Im Labor erfolgten Reflexionsmessungen zur Vergilbung an Laubblättern und Nadeln.

Für die Labormessungen zur Vergilbung von Laubblättern stand dem Lehrstuhl einmalig das in Abschn. 4.3. beschriebene Perkin Elmer Labor-spektroradiometer der Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe in Hannover zur Verfügung.

Die Reflexionsmessungen zur Vergilbung von Nadeln sind dagegen - mit Ausnahme einer einzigen Messung an Kiefern nadeln - ausschließlich mit dem am Lehrstuhl verfügbaren Feldspektroradiometer durchgeführt worden.

Die Vergilbungsgrade der Nadeln bzw. Laubblätter wurden nach einer speziell für Pflanzen entwickelten Farbtabelle (vgl. Abb.60) (MUNSELL COLOR CHARTS FOR PLANT TISSUES) bestimmt und anschließend zu den Farbklassen

- intensivgrün
- grün
- **grüngelb**
- **gelbgrün**
- gelb und
- braun

zusammengefaßt.

FARBE	FARBNUMMER		
intensivgrün	5	GY	4/4
	5	GY	4/6
	7,5	GY	4/6
grün	5	GY	5/6
	5	GY	8/10
grün gelb	2,5	GY	5/6
gelb grün	2,5	GY	5/6
	2,5	GY	6/6
	5	Y	5/6
	5	Y	6/6
gelb	5	Y	6/8
braun	5	Y	7/8

Abb.60: Farbstufen nach "MUNSELL COLOR CHARTS" (Farbtabelle) für Pflanzen

Ziel dieser Untersuchungsreihe war dabei nicht nur die Erfassung des Einflusses, den verschiedene Vergilbungsgrade im sichtbaren Wellenlängenbereich ($0,4 \mu\text{m}$ - $0,7 \mu\text{m}$) auf die Reflexion haben, sondern es sollte anhand dieser Messungen auch geklärt werden, inwieweit die Vergilbung auch auf die pflanzenspezifische Rückstrahlung im nahen ($0,7 \mu\text{m}$ - $1,1 \mu\text{m}$) und kurzwelligen Infrarot ($1,1 \mu\text{m}$ - $2,2 \mu\text{m}$) einwirkt. Die Aufbereitung der Nadelproben für die Messungen in der Photometerkugel erfolgte dabei nach dem in Abschnitt 4.3. beschriebenen Verfahren. Als Probematerial diente jeweils der aus dem Vorjahr stammende Nadeljahrgang.

Die Reflexionsmessungen zur Vergilbung im **Gelände** wurden an einem vital (RÖHLE 1986) und grün wirkenden Fichtenjungbestand (Höglwald 15j.) im Vergleich zu einem gleichaltrigen, deutlich vergilbten und durch Nadelverlust (20 %) gekennzeichneten (Untere Isarauen 18j.) durchgeführt (vgl. Abbn.54 und 56). Die Jungbestände sind in ihrer Bestandesstruktur, d.h. nach Höhe und Bestockungsdichte ähnlich. Die Messungen erfolgten sowohl senkrecht nach unten, als auch mit 45° MZW in den Bestand, wobei mit der letztgenannten Meßanordnung der direkte Bodeneinfluß ausgeschaltet werden konnte. Die Messungen wurden im Verlauf der Vegetationsperiode mehrmals wiederholt.

4.6.4 Untersuchungen zur Reflexion bei Trockenstreß

Im Rahmen der Waldschadensforschung wird immer wieder darauf hingewiesen, daß die an Waldbäumen beobachteten Schadsymptome auf Trockenstreß, verursacht durch krankhafte Veränderungen im Wurzelsystem, in den Leitbahnen oder in den Blättern (Stomata) zurückzuführen sein könnten. Da für Laubblätter ein Einfluß des Wassergehaltes auf die Reflexion als nachgewiesen gilt (vgl. Abschn. 3.1.1.4), ist bisher davon ausgegangen worden, daß es möglich sein müßte, Unterschiede im Wassergehalt auch bei Koniferen mit Hilfe von Fernerkundungsverfahren zu detektieren. Es wurde deshalb der Einfluß von Trockenstreß auf die Reflexion von Fichten und Kiefern untersucht.

Im **Labor** sind dazu Trockenstreßexperimente an 4jährigen Fichtenbäumchen bzw. -nadeln vorgenommen worden.

Die für den Trockenstreßversuch ausgewählten Bäumchen waren bezüglich Größe, Kronendichte und Nadelfarbe vergleichbar. Alle Messungen an den Fichtenbäumchen wurden in der Photometerkugel senkrecht nach unten bei dunklem Untergrund durchgeführt. Bei jedem Trockenstreßversuch erfolgten parallel Messungen an Kontrollbäumchen. Die Kontrollbäume wurden regelmäßig gegossen, während die Streßsituation durch Unterbrechung der Wasserzufuhr über das Abschneiden des Stämmchens erfolgte.

Zur Ausschaltung des Einflusses des Objekthintergrundes wurden neben den Versuchen mit den gestreßten Bäumchen auch Reflexionsmessungen an austrocknenden Nadeln und Zweigen vorgenommen.

Alle Versuche wurden mehrmals wiederholt und solange fortgesetzt, bis bei den Nadeln, Zweigen oder Bäumchen kein Gewichtsverlust mehr zu erkennen war.

An einzelnen Exemplaren konnte darüber hinaus das sich im Verlauf des Trockenstreßversuchs verändernde osmotische Potential der Nadeln am Lehrstuhl für Forstbotanik und Pflanzenphysiologie der Universität München bestimmt werden.

Das Trockenstreßexperiment im **Gelände** wurde in Zusammenarbeit mit amerikanischen Wissenschaftlern der Jet Propulsion Laboratories (JPL) in

Kalifornien und der Universität von Montana im Juli 1986 auf zwei Testflächen (Stadtwald Frankfurt und Forstamt Seeshaupt) realisiert. Im Stadtwald Frankfurt stand für das Experiment ein Strobenjungbestand mit ca. 2000 Bäumen zur Verfügung.

Eine detaillierte Bestandsbeschreibung ist der Tab.11 zu entnehmen.

Allgemeine Bestandeskenngrößen

Waldgebiet	Unterwald	
Oberforstdirektion:	Frankfurt	
Forstamt:	Frankfurt	
Waldabteilung:	Revier 5	Exposition: Ebene

Bestandeskenngrößen

Baumart:	Pinus strobus
Alter:	17
Schädigungsart:	Unterbindung der Wasserzufuhr
Mittlere Bestandeshöhe:	8 m
Bodenwuchs in Flächenprozent (geschätzt):	0 %

Meßanordnung

Meßträger:	Leiterwagen
Meßkopfhöhe über Grund:	20 m
Zielparameter:	Trockenstreß

Tab.11: Bestandesbeschreibung der Strobenversuchsfläche

Für die Durchführung des Experiments wurden die Stroben abgeschnitten und anschließend durch Anbinden der abgeschnittenen Stämme an den Stammfuß wieder aufgerichtet (vgl. Abb.61). Die Reflexionsmessungen erfolgten 21 Tage nach Abschnitt der Stroben.



Abb. 61:

Stroben (*Pinus strobus*)
durch Anbinden an den Stamm-
fuß wieder aufgerichtet

Die Stroben ließen zum Zeitpunkt der Messungen schon leichte Veränderungen in der Nadelstellung erkennen (vgl. Abb.62).

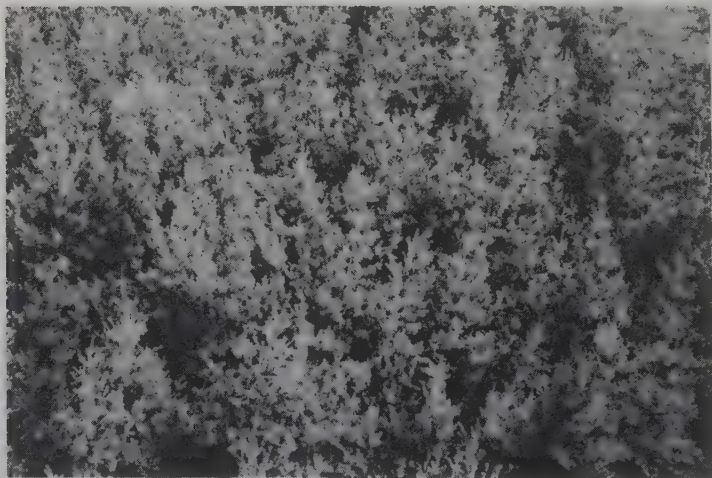


Abb.62: Strobenbestand 21 Tage nach Unterbrechung der Wasserzufuhr

Neben der Strobenfläche war eine weitere, mit 100jährigen Fichten bestockte Fläche des Forstamtes Seeshaupt in das Experiment einbezogen (vgl. Tab.12).

Im Gegensatz zur Strobenfläche wurden die Bäume auf dieser Fläche nicht gefällt und wieder aufgerichtet, sondern die Unterbrechung der Wasserzufuhr erfolgte über das ringförmige Einschneiden des Splints* mit der Kreissäge.

Allgemeine Bestandeskenngrößen

Waldgebiet: Lauterbacher Wald
Oberforstdirektion: München
Forstamt: Seeshaupt
Waldabteilung: Pollingsried Exposition: Ebene

Bestandeskenngrößen

Baumart: Picea abies
Alter: 100 Jahre
Schädigungsart: Unterbindung der Wasserzufuhr
Schädigungsgrad: keiner
Mittlere Bestandeshöhe: 37 m
Bodenbewuchs in Flächenprozent (geschätzt): 100 %

Meßanordnung

Meßträger: Leiterwagen
Meßkopfhöhe über Grund: 50 m
Zielparameter: Trockenstreß

Tab.12: Bestandesbeschreibung der Wasserstreßfläche
Seeshaupt

* äußere wasserführende Holzschichten



Abb.63: Versuchsfläche Seeshaupt
(Trockenstreßexperiment an Fichten)

Die Reflexionsmessungen an den Streßbäumen erfolgten 21 Tage nach Unterbrechung der Wasserzufuhr. Die Vergleichsmessungen an nicht gestreßten Kontrollbäumen wurden am gleichen Tag mit 1-2 Stunden Zeitverschiebung vorgenommen. Eine Verringerung dieses Zeitabstandes war technisch nicht möglich.

Auf beiden Testflächen sind die Bäume senkrecht nach unten, 8 m über der Krone, angemessen worden.

Begleitend zu den Feldspektroradiometermessungen führten amerikanische Kollegen der Jet Propulsion Laboratories und der Universität von Montana Wasserpotentialmessungen mit der Scholanderbombe, und Flugzeugscannerbefliegungen mit dem im Infrarotbereich hochauflösenden AIS-Sensor* durch (RIGGS et al. 1987).

* Airborne Imaging Spectrometer

4.6.5 Untersuchungen zur Reflexion des Baum- bzw. Nadelalters

Als weiterer Parameter wurde der Einfluß des Baumalters auf die über der Krone gemessene Reflexion untersucht. Wie bei allen anderen Untersuchungen sind auch hier parallel zu den Geländemessungen Labormessungen durchgeführt worden.

Für die **Laboruntersuchungen** wurden die Nadeln der jüngsten und der 3jährigen Triebe von 85jährigen und 18jährigen Fichten geerntet. Alle Nadelproben sind den südexponierten Seiten der Sonnenkrone entnommen worden. Es wurden je 6 Proben - getrennt nach Nadeljahrgang und Baumalter - aufbereitet und in der Photometerkugel entsprechend der in Kap. 4.3 beschriebenen Methode gemessen.

Im **Gelände** sind die Messungen für die Altersuntersuchungen über Jungfichten (18 J.) und Altlichten (85 J.) senkrecht nach unten, 8 m über der Krone durchgeführt worden, wobei die Zentrierung der Kronenspitze in der Mitte des Meßausschnittes erfolgte.

Die im Ablauf der Vegetationsperiode mehrmals vorgenommenen Messungen erfolgten unter vergleichbaren Einstrahlungsbedingungen.

5. DARSTELLUNG DER ERGEBNISSE

Die der Auswertung zugrunde liegenden Reflexionskurven beziehen sich auf Messungen aus dem jeweils obersten Kronenbereich, der zu keiner Zeit der Beschattung durch benachbarte Kronen ausgesetzt war. Die Reflexionskurven wurden gewöhnlich normiert ausgegeben, wobei zur Untermauerung der qualitativen Aussage verschiedentlich auch "nicht normierte" Signaturkurven, sowie nicht verrechnete Rohkurven hinzugenommen worden sind. Durch die Normierung (vgl. Abschn. 4.4.2) entsprechen die dargestellten Reflexionsgrade nicht den tatsächlichen, **dies hat jedoch keine Auswirkung auf die vergleichende qualitative Beurteilung des Reflexionsvermögens.** Vereinzelt war es wegen zeitweise auftretender Geräteausfälle nicht möglich, die Wellenlängenbereiche $2,0\ \mu\text{m}$ und $2,2\ \mu\text{m}$ in die Auswertung mit einzubeziehen.

Alle der Auswertung zugrunde liegenden Reflexionskurven sind bei direkter Sonneneinstrahlung bis zu einem Bewölkungsgrad von 5/10 gemessen worden. Der Bewölkungsgrad 5/10 konnte bei ansonst direkt einfallender Sonnenstrahlung akzeptiert werden, da die Sonnenstrahlung nach DIRMHIRN (1964) im Vergleich zur Himmelsstrahlung dominiert.

Den Mittelwertkurven liegen in der Regel 6 - 10 Einzelmessungen zugrunde. Diese begrenzte Anzahl an Einzelkurven war durch den erheblichen technischen und finanziellen Aufwand der Geländemessungen vorgegeben.

Bei der Darstellung der Ergebnisse wurden die Messungen aus den Laboruntersuchungen denjenigen aus den Geländeuntersuchungen vorangestellt. Dabei sind die unter Standardbedingungen durchgeführten Labormessergebnisse Grundlage für die Interpretation der Geländemessungen.

5.1 Veränderung der Reflexion durch Blatt- bzw. Nadelverlust

Im Laufe der Untersuchungen wurde deutlich, daß die Kronenstruktur bzw. die durch sie bewirkte Licht- und Schattenverteilung in der Baumkrone sowie der durchscheinende Untergrund erheblich auf die Kronenreflexion einwirken; es werden deshalb die Ergebnisse aus den Untersuchungen zum Blatt- und Nadelverlust den anderen vorgezogen.

5.1.1 Labormessungen zum Blatt- bzw. Nadelverlust

Entsprechend der in Abschn. 4.6.3 beschriebenen Versuchsanordnung wurden zunächst zur Abschätzung des Einflusses, den durchscheinende dunkle bzw. helle Flächen auf die über der Baumkrone gemessene Reflexion haben, buschig und schütter wirkende Bäumchen bei schwarzem und weißem Untergrund gemessen. Die Reflexionskurven in Abb. 64 zeigen - wie zu erwarten war - einen deutlichen Einfluß des Untergrundes auf die Reflexion in allen Wellenlängenbereichen. Dies umso klarer, da der Anteil des Untergrundes im Vergleich zur Nadelmasse im Meßausschnitt sehr hoch war (vgl. Abb. 57).

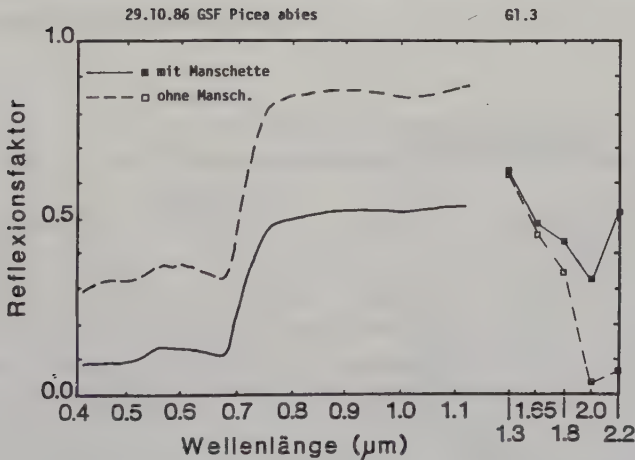


Abb.64: Reflexion, gemessen über Fichtenbäumchen bei hellem und dunklem Untergrund

Die Messungen mit hellem Untergrund zeigen im Vergleich zu denjenigen mit dunklem Untergrund erhöhte Reflexion im sichtbaren Wellenlängenbereich und

im nahen Infrarot. Im kurzwelligen Infrarot liegt die Reflexion bei weißem Untergrund dagegen deutlich niedriger als bei schwarzem Untergrund.

Vergleicht man buschige und schütterere Bäumchen bei dunklem Untergrund, so zeigt sich für das schütterere Bäumchen geringere Reflexion im sichtbaren und nahen Infrarot, bei gleichzeitig erhöhter Reflexion im Wellenlängenbereich 1,8 μm , 2,0 μm und 2,2 μm . Das Reflexionsverhalten von buschigen Bäumchen im Vergleich zu schüttereren Bäumchen bei dunklem Untergrund entspricht damit in etwa dem über einem Bäumchen bei hellem und dunklem Untergrund gemessenen.

Um abschätzen zu können, ob dunkle Flächen in allen gemessenen Wellenlängenbereichen gleich stark auf die über dem Baum gemessene Reflexion wirken, wurden die über den buschigen und schüttereren Fichtenbäumchen bei dunklem Untergrund gemessenen Reflexionskurven im sichtbaren Wellenlängenbereich normiert (0,43 μm) (s. Abschn. 4.4.2) und einander gegenübergestellt.

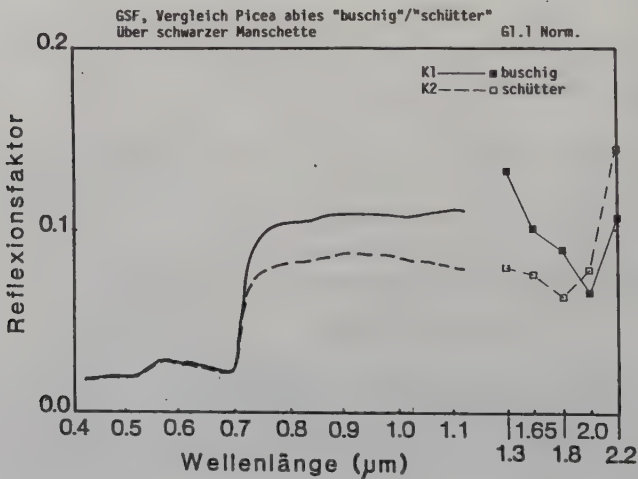


Abb.65: Normierte Reflexionskurven von buschig und schütter wirkenden Fichtenbäumchen über dunklem Untergrund

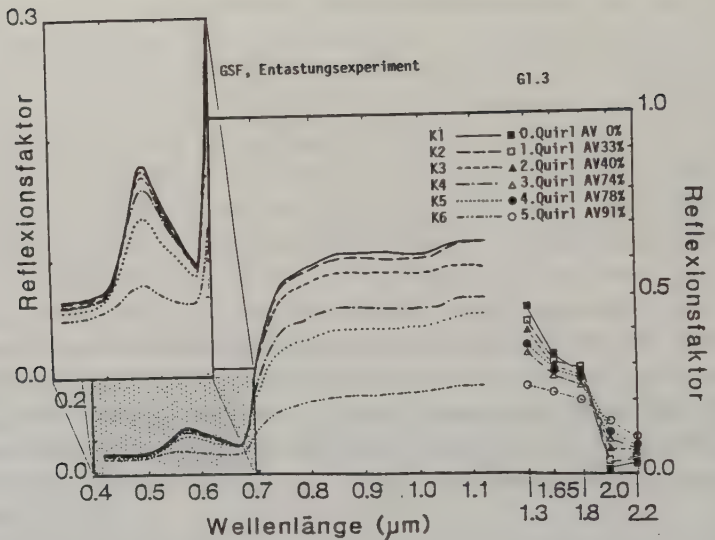
Wie in Abb.65 dargestellt, sind nach der Normierung im sichtbaren Bereich zwar kaum mehr Reflexionsunterschiede zu erkennen, es bleiben aber deutliche Abweichungen zwischen den Reflexionswerten im nahen und kurzwelligen Infrarot bestehen. Dies weist darauf hin, daß der Einfluß, den der Untergrund auf die Reflexion im nahen Infrarot ($0,7\ \mu\text{m}$ - $1,2\ \mu\text{m}$) hat, erheblich über demjenigen im sichtbaren Bereich liegt. Der beobachtete Effekt kann wohl darauf zurückgeführt werden, daß der Einfluß des Untergrundes umso stärker hervortritt, je höher das Reflexions- und je geringer das Streuvermögen des Objektes ist (vgl. KORTÜM 1960). Je weniger Nadelmasse und damit reflektierende (streuende) Nadeloberfläche vorhanden ist, desto stärker wird der Einfluß des dunklen Untergrundes deutlich. Eine Erklärung, warum die Reflexion bei $2,0\ \mu\text{m}$ und $2,2\ \mu\text{m}$ mit zunehmender Entnadelung über dunklem Untergrund ansteigt, könnte dadurch gegeben sein, daß dunkle Flächen in den genannten Wellenlängenbereichen nicht mehr dunkel erscheinen. Zusammen mit dem Rückgang der Absorption der Pflanzen* bei zunehmendem Nadelverlust könnte dann die Reflexion bei dunklem Untergrund ansteigen.

Anhand der Meßergebnisse kann davon ausgegangen werden, daß Unterschiede in der Schattenverteilung der Baumkrone bzw. im durchscheinenden dunklen Untergrund vor allem im nahen und kurzwelligen Infrarot deutlich werden.

In einem zweiten Versuch wurde, um die im Wald zu beobachtende fortschreitende Entnadelung annähernd zu simulieren, die in Abschn. 4.6.3 beschriebene Entastung an Fichten durchgeführt. Die Messungen zu diesem Versuch sind über dunklem Untergrund vorgenommen worden, da der Boden in geschlossenen Fichtenbeständen vorwiegend unbewachsen ist und damit dunkel wirkt.

Wie in Abb. 66 deutlich wird, ergaben die parallel zur stufenweisen Entastung durchgeführten Reflexionsmessungen im **sichtbaren Wellenlängenbereich** bis 74 % Verlust an Astmasse keine nennenswerten Reflexionsunterschiede.

* Die Absorption der Pflanzen ist in diesem Wellenlängenbereich sehr hoch (vgl. Abb.5)



AV = Astmassenverlust

Abb.66: Veränderung der Reflexionskurve bei stufenweiser Entastung von Fichtenbäumchen - gemessen über dunklem Untergrund

Erst ab 78 % entnommener Astmasse kann im Grünbereich ($0,5 \mu\text{m} - 0,6 \mu\text{m}$) ein deutlicher Reflexionsrückgang beobachtet werden. Bei 91 % Verlust an Astmasse fällt die Reflexion im Grün- und Rotbereich ($0,5 \mu\text{m} - 0,7 \mu\text{m}$) in etwa auf das Reflexionsniveau im Blaubereich ($0,4 \mu\text{m} - 0,5 \mu\text{m}$) zurück. Diese letzte deutliche Reflexionsveränderung dürfte jedoch auf die Entnahme der letzten Seitenäste und den damit plötzlichen, fast völlig ungehinderten Einfluß des schwarzen Untergrundes auf den Meßwert zurückzuführen sein.

Im **nahen Infrarot** kann schon ab 40 % entnommener Astmasse ein deutlicher Reflexionsrückgang registriert werden. Der deutlichste Sprung der Reflexion nach unten ist jedoch - wie im Sichtbaren - nach Entnahme des obersten Astquirls zu registrieren.

Im **kurzwelligigen Infrarot** zeigt sich in den Aufnahmebereichen 1,3 μm , 1,65 μm und 1,8 μm ein Rückgang der Reflexion mit zunehmender Entastung, wobei die Unterschiede vor allem im Aufnahmebereich 1,3 μm deutlich werden. In den Kanälen 2,0 μm und 2,2 μm kehrt sich - wie schon in den vorausgegangenen Messungen nachgewiesen - die Reflexion um, d.h. sie steigt durch den mit fortschreitender Entastung zunehmenden Einfluß des dunklen Untergrundes und durch die mit dem Astmassenverlust einhergehende Abnahme der Absorption durch die Pflanze.

Die **Quotienten** - wie sie in Tab. 13 dargestellt sind - steigen mit der zunehmenden Entastung an. Hierbei ist für 660 nm/570 nm und 660 nm/820 nm zunächst kein Unterschied im Quotient zu erkennen, d.h. der zunehmende Einfluß des Untergrundes wird erst bei massiven Verlusten an grüner Astmasse (40 %) anhand dieser Quotienten erkennbar.

Für den Wellenlängenbereich 1,1 μm - 2,2 μm wird der Verlust von grüner Nadelmasse fast von Anbeginn durch die Veränderung des Quotienten deutlich.

Kurve Nr.	Quotient 660 nm/570 nm	Quotient 660 nm/820 nm	Quotient 1650 nm/1100 nm
1 (0 % AV)	.62	.15	.44
2 (33 % AV)	.63	.15	.45
3 (40 % AV)	.63	.16	.52
4 (74 % AV)	.67	.19	.56
5 (78 % AV)	.70	.20	.66
6 (91 % AV)	.83	.29	.90

Tab. 14: Quotienten zur Reflexionsveränderung bei zunehmendem Verlust an grüner Astmasse (AV)

Die **Maxima und Minima** zeigen, wie anzunehmen war, im sichtbaren Wellenlängenbereich keine Verschiebungen. Im nahen Infrarot ist jedoch für die Lage der Wasserabsorptionsdelle ($0,98 \mu\text{m}$ - $1,0 \mu\text{m}$) ab 40 % Verlust an Astmasse eine deutliche Veränderung zu registrieren. Während bis 40 % Verlust an Astmasse das Reflexionsminimum bei $1,0 \mu\text{m}$ liegt, ist ab 74 % Verlust an Astmasse das Reflexionsminimum auf $0,98 \mu\text{m}$ verschoben und kann für die letzten beiden Messungen nicht mehr festgestellt werden (vgl. Tab. A 1 im Anhang).

Diese Verschiebung des Reflexionsminimums zu kürzeren Wellenlängenbereichen hin bei Abnahme der Vitalität bzw. zunehmendem Nadelverlust wird auch in den folgenden Untersuchungen immer wieder deutlich.

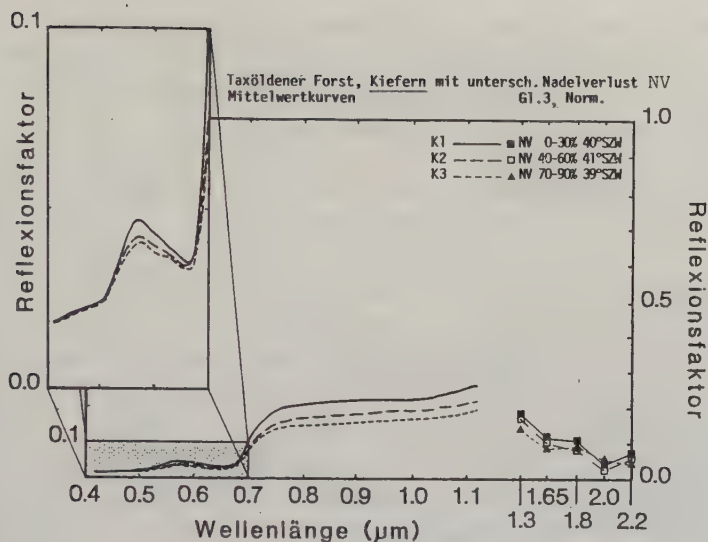
5.1.2 Geländemessungen zum Blatt- bzw. Nadelverlust

Die Geländemessungen zum Blatt- bzw. Nadelverlust wurden an Kiefern vorgenommen. Wie in Kap. 4.6.3 beschrieben, wurden für die Auswertung der Reflexionskurven die Kiefern zu drei Schadklassen zusammengefaßt:

- 0 - 30 % Entnadelung
- 40 - 60 % Entnadelung
- 70 - 90 % Entnadelung

Für die in die Auswertung einbezogenen Kiefern konnten **keine** Vergilbungen beobachtet werden und der Untergrund wirkte zum Zeitpunkt der Messungen **dunkelbraun**.

Entsprechend der Darstellung in Abb.67 konnte im **sichtbaren Wellenlängenbereich** mit zunehmender Entnadelung ein leichter Reflexionsrückgang beobachtet werden, der jedoch vernachlässigbar gering war.



MITTLERE VARIANZ	Kurve Nr.		
	1	2	3
VIS (0.4-0.7µm):	.00002	.00000	.00000
NIR (0.7-1.13µm):	.00089	.00006	.00009
SWIR (1.3µm):	.00079	.00022	.00008
(1.65µm):	.00031	.00012	.00001
(1.8µm):	.00027	.00015	.00004
(2.0µm):	.00006	.00004	.00002
(2.2µm):	.00031	.00019	.00016

Abb.67: Reflexionskurven für Kiefern mit unterschiedlichem Entnadelungsgrad (NV). Messungen durchgeführt bei gleichem Sonnenzenitwinkel.

Im **nahen Infrarot** sinkt die über der Krone gemessene Reflexion dagegen mit zunehmendem Nadelverlust deutlich ab (vgl. Abschn. 5.1.1).

Im **kurzwelligen Infrarot** liegen die gemessenen Reflexionswerte eng zusammen, bei genauer Betrachtung ist jedoch für die entnadelten Bäume eine leicht erhöhte Reflexion im Wellenlängenbereich 2,0 µm und 2,2µm zu erkennen. Der hier fehlende deutliche Anstieg der Reflexion mit zunehmendem Einfluß des dunklen Untergrundes, wie er im Labor nachgewiesen werden konnte, ist wohl darauf zurückzuführen, daß der natürliche dunkle Untergrund nicht in derselben Weise die Reflexion beeinflusst wie der künstliche und der Anteil der reflektierenden Baumkrone im Vergleich zum Untergrund im Meßausschnitt dominiert.

Entsprechend der Meßergebnisse im Labor weist der Rückgang im nahen Infrarot bei gleichzeitigem Anstieg im kurzwelligen Infrarot (2,0 μm und 2,2 μm) auf einen zunehmenden Einfluß des dunklen Untergrundes bzw. auf einen Rückgang an absorbierender Nadelmasse hin.

Betrachtet man die **Quotienten**, so zeigt sich für die am dichtesten benadelten Bäume jeweils der geringste Wert (vgl. Tab. 14).

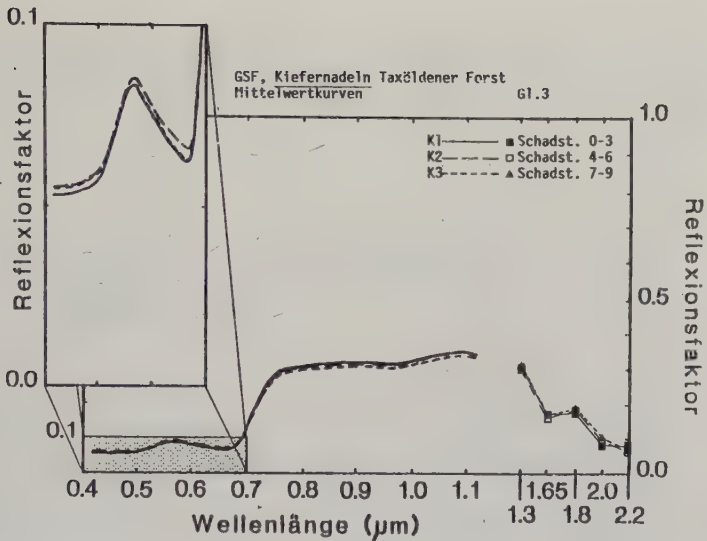
Kurve Nr.	Quotient 660 nm/570 nm	Quotient 660 nm/820 nm	Quotient 1650 nm/1100 nm
1 (0-20 % NV)	.73	.13	.44
2 (40-50 % NV)	.78	.16	.45
3 (70-80 % NV)	.78	.22	.50

Tab.14: Quotienten zur Reflexionsveränderung bei Kiefern mit zunehmendem Nadelverlust (NV)

Die Auswertung der **Reflexionsminima und -maxima** ergab im sichtbaren Wellenlängenbereich und nahen Infrarot keine Verschiebungen (vgl. Tab. A2 im Anhang).

Ein Rückgang der Reflexion im nahen Infrarotbereich wird oft im Zusammenhang mit Zellstrukturveränderungen in der Nadel gebracht. Um zu klären, ob für den gemessenen Kiefernbestand der Rückgang der Reflexion im nahen Infrarot auch auf nadelspezifische Veränderungen zurückzuführen ist, wurden von den in die Messungen einbezogenen Kiefern Nadelproben aus dem obersten Sonnenkronenbereich entnommen (vgl. Abschn. 4.6.1). Die für die Nadelproben gemessenen Reflexionskurven wurden entsprechend dem Entnadelungsgrad des Erntebaums einer der drei Schadstufen zugeordnet.

Die Reflexionskurven in Abb. 68 lassen für die Nadelproben im **sichtbaren Wellenlängenbereich** sowie im **nahen und kurzwelligen Infrarotbereich** keine Differenzierungen erkennen.



MITTLERE VARIANZ		Kurve Nr.		
		1	2	3
VIS	(0.4-0.7µm):	.00123	.00134	.00122
NIR	(0.7-1.13µm):	.01305	.01447	.01642
SWIR	(1.3µm):	.01947	.02366	.02363
	(1.65µm):	.00392	.00459	.0047
	(1.8µm):	.00635	.008	.00784
	(2.0µm):	.00149	.00197	.00235
	(2.2µm):	.00034	.0004	.00064

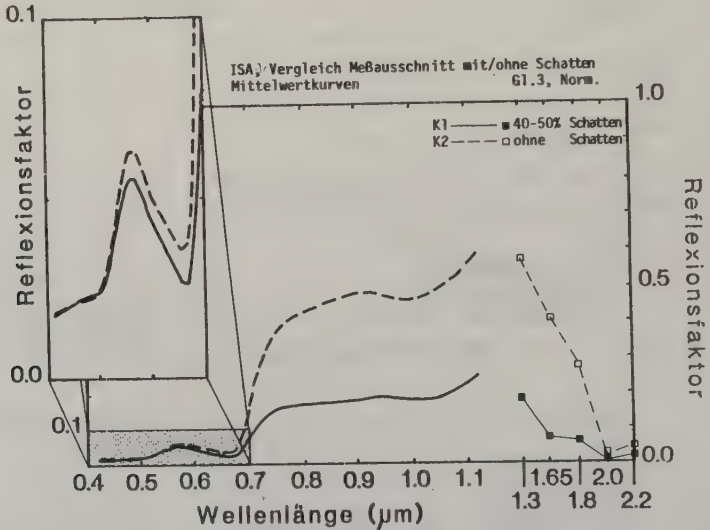
Abb.68: Reflexionskurven für **Nadelproben** von Kiefern mit unterschiedlichem Entnadelungsgrad

Auch die Analyse der **Quotienten** und der **Reflexionsminima** bzw. **-maxima** ergaben keine Unterschiede (vgl. Tab. A3 im Anhang).

Dieses Meßergebnis läßt darauf schließen, daß die Abschwächung der Reflexion im nahen Infrarot, wie sie mit Feldspektorradiometern und Scannern bei Nadelverlust über Wald gemessen werden kann, in erster Linie auf Kronenstrukturveränderungen oder auf den durchscheinenden Untergrund zurückzuführen ist.

Untersuchungen an Fichten mit unterschiedlichem Schattenanteil in der Krone bestätigen diese Annahme. Vergleicht man die in Abb.69 dargestell-

ten Mittelwertkurven für die Reflexion von vitalen grünen Fichten ohne Schatten und mit 40 - 50 % Schatten im Meßausschnitt, so zeigen sich im **sichtbaren Wellenlängenbereich** nach der Normierung kaum Unterschiede in der Reflexion.



MITTLERE VARIANZ		Kurve Nr.	
		1	2
VIS	(0.4-0.7µm):	.0003	.00002
NIR	(0.7-1.13µm):	.01397	.00431
SWIR	(1.3µm):	.00669	.02168
	(1.65µm):	.00129	.03666
	(1.8µm):	.00055	.01461
	(2.0µm):	.00001	.00089
	(2.2µm):	.00002	.00269

Abb.69: Reflexion von gesunden Fichten ohne und mit 40 - 50 % Schatten im Meßausschnitt der Krone

Im **nahen Infrarot** kann dagegen für die Messungen mit hohem Schattenanteil im Meßausschnitt ein starker Reflexionsrückgang registriert werden. Im **kurzwelligen Infrarot** sind für die Wellenlängenbereiche 1,3 µm, 1,65 µm und 1,8 µm bei 40 - 50 % Schatten im gemessenen Kronenausschnitt noch geringere Reflexionsintensitäten im Verhältnis zu den Messungen ohne Schatten zu beobachten. Bei 2,0 und 2,2 µm können jedoch kaum mehr Unterschiede in den Reflexionswerten für Bäume ohne und mit hohem Schattenanteil nachgewiesen werden. Dieser Reflexionsverlauf ist dem, der für Kiefern mit zu-

nehmendem Nadelverlust über dunklem Untergrund gemessen werden konnte, ähnlich. Schatten zeigt damit in etwa die gleiche Auswirkung auf die Reflexion wie durchscheinender dunkler Untergrund, d.h. Reflexion wird im sichtbaren Bereich und deutlicher im nahen Infrarot geschwächt. Allerdings konnte der leichte Anstieg der Reflexion in den Wellenlängenbereichen 2,0 μm und 2,2 μm - wie er für dunklen Untergrund vorliegt - hier nicht nachvollzogen werden, es kann deshalb angenommen werden, daß dunkler Untergrund bzw. Schatten kaum Einfluß auf die Reflexion in den genannten Bereichen zeigen.

Betrachtet man die Quotienten, so ergibt sich aus dem Verhältnis 660 nm/570 nm sowie 660 nm/820 nm und 1.650 nm/1.100 nm ein deutlich größerer Quotient für die Messungen mit hohem Schattenanteil (vgl. Tab. 15).

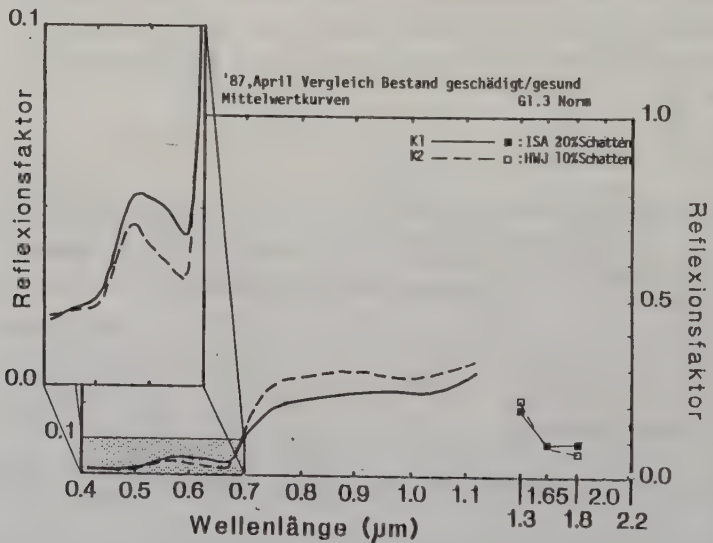
Kurve Nr.	Quotient 660 nm/570 nm	Quotient 660 nm/820 nm	Quotient 1650 nm/1000 nm
1 10% Schatten	.45	.22	.34
2 40-50% Schatten	.54	.07	.82

Tab.15: Quotienten für die Reflexion von gesunden Fichten ohne Schatten und mit 40 - 50 % Schatten im Meßausschnitt der Krone

Daraus folgt, daß der von HORLER (1983) für die Beurteilung der Vitalität von Pflanzen vorgeschlagene Quotient (660 nm/820 nm) durch Schatten beeinflusst werden kann.

Eine Verschiebung der **Minima und Maxima** war in keinem Fall zu beobachten (vgl. Tab. A4 im Anhang).

Vergleicht man dazu die Reflexion von vitalen grünen Fichten mit 10 % Schatten im Meßausschnitt mit der Reflexion gleichaltriger vergilbter Fichten mit 20 % Schatten im Meßausschnitt, so läßt sich der – anhand von Scannerdaten mehrfach beobachtete – Kurvenverlauf (vgl. Abschnitt 3.2.1.4), d.h. erhöhte Reflexion im sichtbaren Wellenlängenbereich und geringere Reflexion im nahen Infrarotbereich für die Fichten mit 20 % Schatten beobachten.



MITTLERE VARIANZ		Kurve Nr.	
		1	2
VIS	(0.4-0.7µm):	.00003	.00005
NIR	(0.7-1.13µm):	.00043	.00293
SWIR	(1.3µm):	.00037	.00138
	(1.65µm):	.0004	.00033
	(1.8µm):	.00267	.00007
	(2.0µm):	.01487	.00008
	(2.2µm):	.03193	.00003

Abb.70: Reflexion von vitalen grünen Fichten mit 10 % Schatten im Meßausschnitt im Vergleich zu vergilbten Fichten mit 20 % Schatten im Meßausschnitt

Wie die Abb. 70 zeigt, liegt im **sichtbaren Bereich** die Reflexion für die vergilbten Fichten mit mehr Schattenanteil über derjenigen der grünen Fichten. Dieser Reflexionsanstieg ist auf die Vergilbung zurückzuführen, wie sie in Abschnitt 5.3 beschrieben wird.

Im **nahen Infrarot** kehrt sich das Reflexionsverhalten um und die Reflexionswerte für die vergilbten Fichten mit hohem Schattenanteil liegen nun unter denjenigen, die für grüne Fichten gemessen werden konnten.

Im **kurzwelligen Infrarot** liegt die Reflexion der grünen Fichten bei $1,3 \mu\text{m}$ und $1,6 \mu\text{m}$ noch über derjenigen der vergilbten Fichten. Nach $1,8 \mu\text{m}$ ist aber die Reflexion der Fichten mit hohem Schattenanteil im Vergleich zu denjenigen mit geringem Schattenanteil erhöht. Damit zeigt die Reflexionskurve für vergilbte Fichten mit hohem Schattenanteil im kurzwelligen Infrarot annähernd das im Labor bei Messungen über schütterten Bäumchen mit schwarzem Untergrund beobachtete Verhalten, wobei der Anstieg der Reflexion wohl überwiegend auf die schwächere Absorption der schütter benadelten, vergilbten Fichten zurückzuführen ist.

Anhand dieser Ergebnisse kann angenommen werden, daß die auf der Grundlage von Flugzeugscanner- bzw. Satellitendaten über geschädigten Fichtenbeständen beobachteten Reflexionsveränderungen im sichtbaren Bereich zwar durch den pflanzenspezifischen Einfluß der Pigmentierung hervorgerufen werden, im nahen Infrarot jedoch vorwiegend auf Kronenstruktur- bzw. Schattenmerkmale (Helligkeitsunterschiede) oder durchscheinenden Untergrund zurückzuführen sind. Dies würde im Extremfall bedeuten, daß aufgrund der genannten Parameter ein dunkel wirkender gesunder Bestand (z.B. grüne Kammfichten) geringere Reflexion im Infrarot zwischen $0,7 \mu\text{m}$ und $1,8 \mu\text{m}$ zeigen kann, als ein geschädigter hell wirkender Bestand (z.B. vergilbte noch vollbenadelte Bürstenfichten).

Die **Quotienten** zeigen für die vergilbten Bäume im sichtbaren Bereich den kleinsten Wert, im nahen und kurzwelligen Infrarot jeweils die größten Werte.

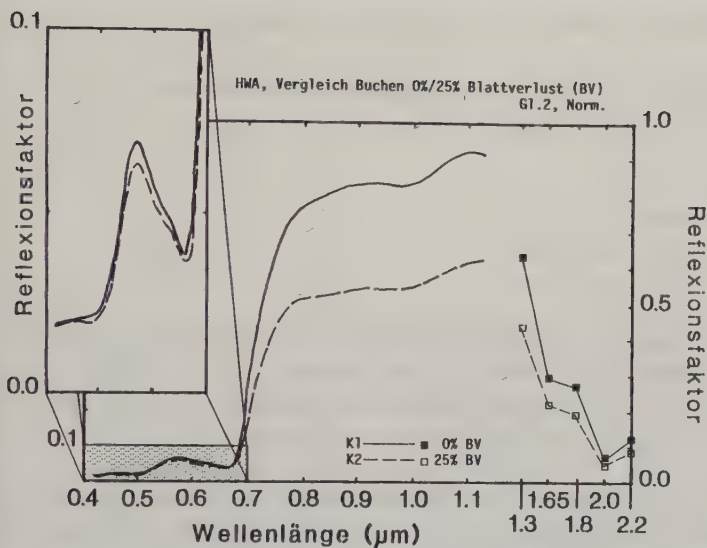
Kurve Nr.	Quotient 660 nm/570 nm	Quotient 660 nm/820 nm	Quotient 1650 nm/1100 nm
1 20 % Schatten	.56	.12	.27
2 10 % Schatten	.57	.10	.20

Tab.16: Quotienten für die Reflexion vitaler grüner Fichten mit 10 % Schatten im Meßausschnitt und vergilbter Fichten mit 20 % Schatten im Meßausschnitt

Die Vergilbung wird für die Fichten mit mehr Schattenanteil auch durch die Verschiebung der **Minima und Maxima** deutlich. Die Mittelwertkurve zeigt für die vergilbten Bäume im sichtbaren Bereich eine Verschiebung des Reflexionsmaximums und -minimums um 10 nm zu größeren Wellenlängenbereichen hin (vgl. Tab. A5 im Anhang). Desweiteren ist für die vergilbte Fichte eine Verlagerung der Wasserabsorptionsdelle (0,98 nm - 1,0 µm) zu kürzeren Wellenlängenbereichen zu beobachten.

Die Reflexionsuntersuchungen zum **Blattverlust an Buche** zeigen - ähnlich wie dies für Kiefer festgestellt werden konnte, im **sichtbaren Wellenlängenbereich** kaum Unterschiede in der Reflexion, im **nahen Infrarot** liegen jedoch für die Buche mit 25 % Blattverlust (siehe Kapitel 4.6.3) wesentlich geringere Reflexionswerte als für die vollbelaubte Buche vor. Im **kurzwelligen Infrarot** kann in den Wellenlängenbereichen 1,3 µm, 1,65 µm und 1,8 µm noch erhöhte Reflexion für die vollbelaubte Buche registriert werden, in den Wellenlängenbereichen 2,0 und 2,2 µm ist fast keine Differenzierung mehr in der Reflexion zwischen der vollbelaubten und der durch Blattverlust gekennzeichneten Buche festzustellen (vgl. Abb. 71).

Die Buche mit Blattverlust zeigt im Vergleich zur vollbelaubten für alle Quotienten größere Werte (vgl. Tab. 17).



MITTLERE VARIANZ		Kurve Nr.	
VIS	(0.4-0.7µm):	.00053	.00022
NIR	(0.7-1.13µm):	.01039	.01382
SWIR	(1.3µm):	.01903	.00236
	(1.65µm):	.00603	.00108
	(1.8µm):	.01032	.00184
	(2.0µm):	.00308	.00042
	(2.2µm):	.01347	.00186

Abb.71: Reflexion von Buche mit Blattverlust im Vergleich zu Buche ohne Blattverlust, gemittelt über die Vegetationsperiode

Kurve Nr.	Quotient 660 nm/570 nm	Quotient 660 nm/820 nm	Quotient 1650 nm/1100 nm
1 0 % BV	.51	.08	.30
2 25 % BV	.54	.09	.34

Tab.17: Quotient für die Reflexion von Buche mit und ohne Blattverlust (BV).

Eine Verschiebung der **Minima und Maxima** im sichtbaren Wellenlängenbereich war nicht zu erkennen. Im nahen Infrarotbereich konnte aber für die Buche mit Blattverlust der Rückgang der Wasserabsorptionsbande festgestellt werden (vgl. Tab. A6 im Anhang).

5.2 Reflexion von Fichte und Buche im Jahresrhythmus

Die Veränderung der Reflexion von Waldbäumen im Jahresrhythmus ist im wesentlichen von 4 Faktoren beeinflusst:

- Blattmasse
- Pigmentation des Blattes
- Zellstruktur des Blattes
- Wassergehalt des Blattes

Neben diesen baumspezifischen Einflüssen auf die Rückstrahlungseigenschaften der Bäume wirken auch jahreszeitliche Schwankungen im Einstrahlungswinkel, in der Einstrahlungsintensität und im Untergrundbewuchs (Bodenvegetation) auf die über den Waldbäumen gemessene Reflexion ein.

Für die Schadenserfassung bzw. Waldinventur auf der Basis von Fernerkundungsdaten ist es wichtig, die natürlichen Reflexionsveränderungen im Jahresrhythmus zu kennen. Dabei sollte eine Trennung zwischen baumspezifischen und äußeren Einflußparametern möglich sein. Zur Klärung dieser Zusammenhänge wurden die in Abschnitt 4.6.1 beschriebenen Reflexionsmessungen zum Jahresgang im Labor und Gelände durchgeführt.

5.2.1 Labormessungen zum Jahresgang der Reflexion von Fichten

Wie in Abschnitt 4.6.1 beschrieben, wurden für die im Labor durchgeführten Jahresgangsmessungen zur Reflexion Fichtenbäumchen eingetopft und über das Jahr hinweg im Freien dem natürlichen Vegetationsrhythmus ausgesetzt. Die Messungen, die von April bis September erfolgten, sind in der Photometerkugel unter standardisierten Außenbedingungen durchgeführt worden.

Die Auswertung der Messungen zeigt für die Monate April bis Juli im **sichtbaren Wellenlängenbereich** und im **nahen Infrarotbereich** eine allmähliche Zunahme der über den Bäumchen gemessenen Reflexion (vgl. Abb. 72). Das Ansteigen der Reflexion im Sichtbaren und nahen Infrarot kann wohl in erster Linie auf die Zunahme der Nadelmasse (vgl. Abschn. 1.3) bzw. der reflektierenden Nadeloberfläche (vgl. Abschn. 5.1.1) zurückgeführt werden, aber auch eine Beeinflussung der Reflexion durch

die in der Streckungsphase auftretenden spezifischen Zellveränderungen (Vacuolenbildung) der jungen Nadeln ist anzunehmen (GAUSMANN 1970). Nach Ausdifferenzierung des Zellgewebes und mit zunehmender Sclerenchymierung* der Nadeln ab Ende Juli fallen die Reflexionswerte dann wieder zurück.

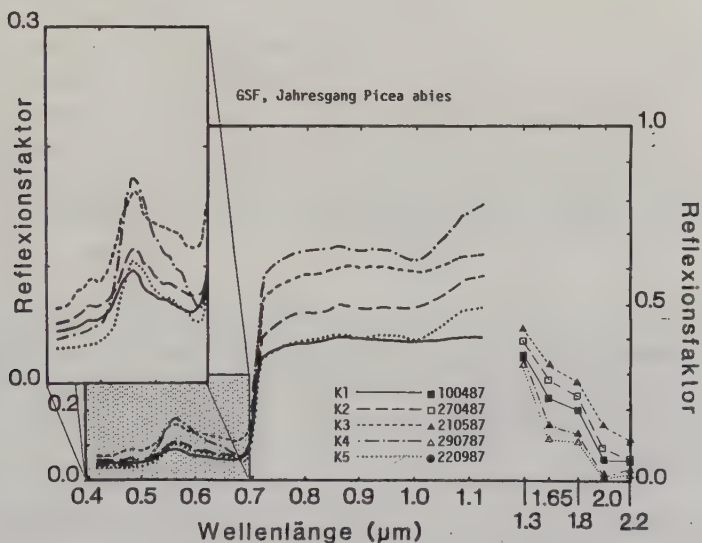


Abb.72: Reflexion von eingetopften Fichtenbäumchen im Jahresgang

Im **kurzweligen Infrarot** ist von April bis Mai - dem nahen Infrarot vergleichbar - zunächst ein leichter Anstieg der Reflexion zu erkennen, wahrscheinlich hervorgerufen durch die Volumenzunahme der Zellen (vgl. Abb.11). Im Juli sinken jedoch die Reflexionswerte im kurzweligen Infrarot deutlich ab.

Die Auswertung der **Quotienten** läßt im sichtbaren Wellenlängenbereich

* Sclerenchym: Festigungsgewebe

670 nm/570 nm, bedingt durch den Anstieg des Reflexionspeaks zunächst eine Abnahme der Werte bis einschließlich Juli erkennen. Für September ist sehr schön der Reflexionsrückgang, d.h. das Nachdunkeln der Nadeln, durch den leichten Wiederanstieg des Wertes verdeutlicht (vgl. Tab.19).

Kurve Nr.	Quotient 660 nm/570 nm	Quotient 660 nm/820 nm	Quotient 1650 nm/1100 nm
1 (10.4)	.74	.17	.60
2 (27.4)	.70	.16	.60
3 (21.5)	.67	.15	.58
4 (29.7)	.51	.15	.32
5 (22.9)	.56	.15	.37

Tab.18: Quotienten zur Reflexion von Fichte im Jahresgang anhand von Laboruntersuchungen

Der Quotient 660 nm/820 nm wird von April bis Mai zunächst geringer und weist damit auf einen Reflexionsanstieg im nahen Infrarot bzw. nach HORLER (1983) auf einen Vitalitätsanstieg hin. Ab Mitte Mai bleiben die Werte konstant, d.h. der Rückgang der Reflexion im nahen Infrarot wird hier nicht deutlich.

Der Quotient 1650 nm/1100 nm verhält sich für die ersten 3 Messungen fast konstant und verdeutlicht damit den gleichmäßigen Anstieg der Reflexion im nahen und kurzwelligen Infrarot. Der Reflexionsrückgang im kurzwelligen Infrarot für den Monat Juli wird durch den sehr geringen Quotienten deutlich und auch im September scheint aufgrund des Quotienten der Rückgang der Reflexion im Kurzwelligen ähnlich demjenigen im nahen Infrarot zu sein.

Die Auswertung der **Reflexionsminima** und **-maxima** im sichtbaren Bereich zeigt eine Verschiebung des Reflexionspeaks im Grünen (0,5 μ m - 0,6 μ m) von Juli bis September zu längeren Wellenlängenbereichen hin.

Die Lage der Wasserabsorptionsdelle (0,98 μ m - 1,0 μ m) verschiebt sich von kürzeren Wellenlängenbereichen (0,98 μ m) im Frühjahr zu längeren (1,0 μ m) hin, wie dies wiederholt bei Vitalitätszunahme beobachtet werden konnte (vgl. Tab. A7 im Anhang).

5.2.2 Geländemessungen zum Jahresgang der Reflexion von Fichten und Buchen

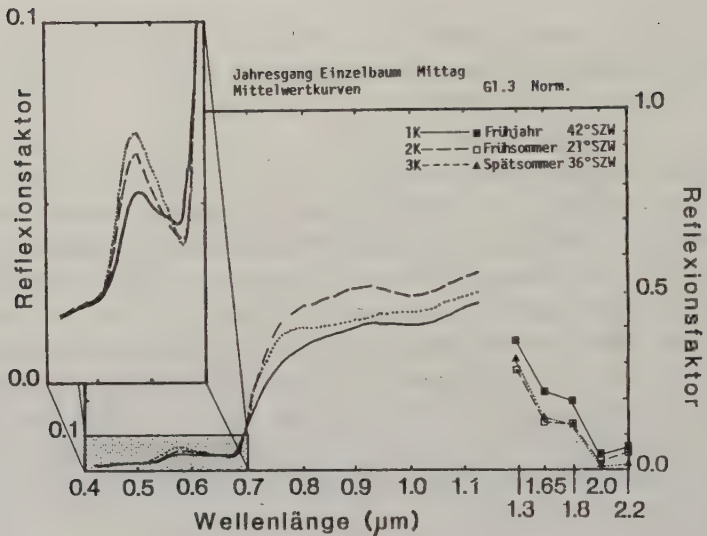
Die Auswertung der Geländemessungen zum Jahresgang der Reflexion von Fichten erfolgte bei gleicher Tageszeit sowie bei gleichem Sonnenzenitwinkel. Die Bewertung der Reflexion im Jahresgang bei gleicher Tageszeit erschien sinnvoll, da die Planung für Scannerbefliegungen vorwiegend nach Tageszeitkriterien erfolgt und auch Satelliten am gleichen Ort immer zur gleichen Tageszeit Daten erfassen. Die zweite Auswertung bei gleichem Sonnenzenitwinkel wurde deshalb vorgenommen, weil aus den Voruntersuchungen bekannt war, wie stark der Einfallswinkel der Sonne die über dem Bestand gemessene Reflexion verändern kann. Für die Bildung der Mittelwertkurven wurde die Vegetationsperiode wie in Abschnitt 4.6.1 beschrieben in drei Entwicklungsphasen unterteilt:

- Frühjahr (vor Austrieb der Nadeln)
- Sommer (Hauptwachstumsphase) und
- Spätsommer (nach Abschluß der Wachstumsphase)

5.2.2.1 Messungen zum Jahresgang der Reflexion von Fichten bei gleicher Tageszeit

In die Auswertung zum Jahresgang der Reflexion bei gleicher Tageszeit wurden Messungen zwischen 12.00 Uhr MEZ und 13.30 Uhr MEZ einbezogen. Damit ergab sich für die Mittelwertkurve im Frühjahr (April) ein durchschnittlicher SZW von 42°, im Sommer (Juni) von 21° SZW und im Spätsommer (August/September) von 36° SZW.

Die in Abb.73 dargestellten Kurven zeigen im **sichtbaren Wellenlängenbereich** im Frühjahr die geringsten Reflexionswerte. Die schwache Reflexion im Frühjahr entspricht dem im Labor vorgefundenen Verhalten. Die Sommerkurve zeigt im sichtbaren Wellenlängenbereich die höchsten Reflexionswerte, bei gleichzeitig ausgeprägter Chlorophyllabsorption (0,68 µm). Der deutliche Reflexionspeak im Grünen (0,57 µm) ist mit großer Sicherheit auf die frischen hellgrünen Triebe zurückzuführen. Die Spätsommerwerte lassen einen der Sommerkurve ähnlichen Reflexionsverlauf im Sichtbaren erkennen, wenn auch mit etwas geringeren Reflexionsintensitäten.



MITTLERE VARIANZ		Kurve Nr.		
VIS	(0.4-0.7µm):	.00424	.00011	.00006
NIR	(0.7-1.13µm):	.23884	.02031	.00476
SWIR	(1.3µm):	.00424	.01864	.01397
	(1.65µm):	.00088	.00702	.00193
	(1.8µm):	.00099	.00009	.00083
	(2.0µm):	.00052	.00074	.00003
	(2.2µm):	.00185	.00232	.00116

Abb.73: Reflexion von Fichten im Jahresgang gemessen bei gleicher Tageszeit

Im **nahen Infrarotbereich** liegt die Spätsommerkurve deutlich über den Sommerwerten und weicht damit von dem im Labor gemessenen Reflexionsverhalten ab. Die Abschwächung der Reflexion im Sommer im Vergleich zum Spätsommer ist nach den Erfahrungen aus den Voruntersuchungen zum Tagesgang der Reflexion mit großer Wahrscheinlichkeit auf den steileren Einfallswinkel der Sonne zurückzuführen. Die Frühjahrswerte zeigen - wie schon im Sichtbaren - die geringste Reflexion.

Im **kurzwelligigen Infrarotbereich** können die höchsten Reflexionswerte für die Frühjahrsmessungen beobachtet werden, während die Sommermessungen keine Unterschiede zeigen. Die erhöhte Reflexion für die Frühjahrsmessung könnte durch geringere Nadelmasse (Blattabsorption) bewirkt worden sein (TEILLET 1985).

Der Farbeffekt der frisch ausgetriebenen Nadeln wird über den Quotienten 660 nm/570 nm durch den geringen Wert im Sommer deutlich (Tab.19). Auf die Quotienten 660 nm/820 nm und 1650 nm/2200 nm schlägt der Einfluß des Sonnenzenitwinkels durch und deshalb wird im Spätsommer der kleinste Wert registriert.

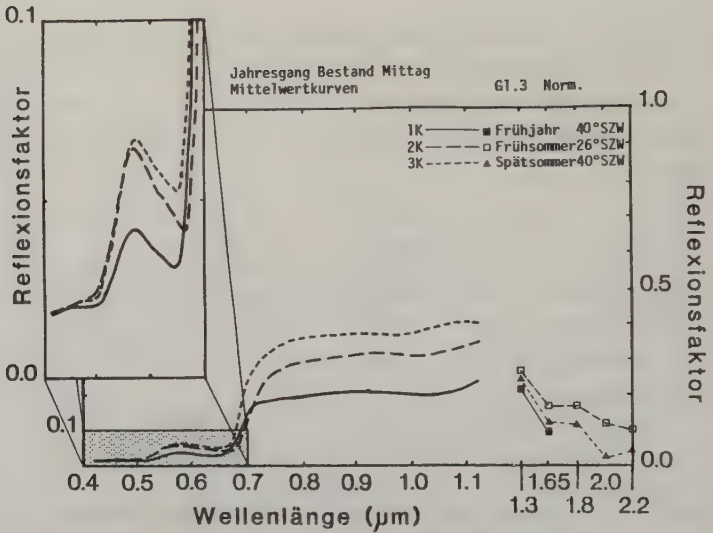
Kurve Nr.	Quotient 660 nm/570 nm	Quotient 660 nm/820 nm	Quotient 1650 nm/1100 nm
1 Frühjahr/42° SZW	.79	.12	.47
2 Sommer/21° SZW	.51	.09	.27
3 Spätsommer /36° SZW	.57	.08	.25

Tab.19: Quotienten zur Reflexion von Fichten im Jahresgang bei gleicher Tageszeit: 12.00 Uhr bis 13.30 Uhr MEZ

Die Differenz zwischen Sommer und Spätsommer für diese beiden Quotienten ist allerdings vernachlässigbar gering, sodaß nach HORLER (1983) von einem etwa gleichen Vitalitäts- bzw. Entwicklungszustand der Bäume ausgegangen werden kann. Dies zeigt, daß mit Hilfe der Quotienten die baumspezifische Reflexion wohl besser erfaßt werden kann, d.h. Beschattung und Besonnung könnten einen geringeren Einfluß haben.

Zusätzlich zu den Jahresgangsmessungen mit 0° MZW wurden auch Messungen mit 45° MZW durchgeführt. Die Auswahl und Zusammenstellung der Kurven erfolgte nach den schon beschriebenen Kriterien. Bei allen Schrägmessungen wurde jedoch darauf geachtet, daß die Winkeldifferenz zwischen Sonnenzenitwinkel und Meßzenitwinkel $>4^\circ$ war, um den sogenannten Hotspot-Effekt (in Sonnenrichtung reflektierte Strahlung) zu vermeiden.

Die Auswertung der Messungen zum Jahresgang der Reflexion mit 45° MZW bei gleicher Tageszeit zeigt - ähnlich den Messungen mit 0° MZW - im **Sichtbaren** die geringste Reflexion im Frühjahr. Im **nahen Infrarot** sind die niedrigsten Reflexionswerte vor Austrieb der Bäume (Frühjahr), mittlere Reflexionswerte für die Sommermessungen (Juni) und die höchsten Reflexionswerte für die Spätsommernmessungen zu erkennen (vgl. Abb.74).



MITTLERE VARIANZ		Kurve Nr.		
VIS	(0.4-0.7µm):	.00091	.00419	.00103
NIR	(0.7-1.13µm):	.00536	.74194	.01565
SWIR	(1.3µm):	.00312	.15109	.00848
	(1.65µm):	.0004	.09215	.00286
	(1.8µm):		.09136	.00338
	(2.0µm):		.07612	.0002
	(2.2µm):		.05227	.00043

Abb.74: Reflexion von Fichten im Jahresgang bei gleicher Tageszeit, und mit 45° MZW

Betrachtet man den durchschnittlichen Sonnenzenitwinkel, der den Mittelwertkurven zugrunde liegt, so fällt auf, daß die Sonnenzenitwinkel für die Frühjahrs- und Spätsommerkurve in etwa gleich sind. Daraus ist abzuleiten, daß die in der Graphik dargestellten Abweichungen in der Reflexionsintensität - d.h. die höheren Reflexionswerte für die Spätsommerkurve - im sichtbaren Bereich und im nahen Infrarotbereich in erster Linie auf baumspezifische Einflußparameter zurückzuführen sind.

Im **kurzwelligen Infrarotbereich** wird ein Anstieg der Reflexion für die Sommerwerte (Juni) im Vergleich zu den Spätsommerwerten (August/September) deutlich. Eine Erklärung hierfür kann jedoch im Rahmen dieser Arbeit nicht gegeben werden, da weder geringere Nadelmasse, noch der Einfluß des Untergrundes hier eine Rolle gespielt haben dürften. Für die Frühjahrskurve liegen aufgrund eines Gerätefehlers keine Reflexionswerte im kurzwelligen Infrarotbereich vor.

Wie in Tab.20 dargestellt, ergaben die Quotienten 660 nm/820 nm und 1650 nm/1100 nm - ähnlich den Messungen mit 0° MZW - die geringsten Werte für den Spätsommer.

Kurve Nr.	Quotient 660 nm/570 nm	Quotient 660 nm/820 nm	Quotient 1650 nm/1100 nm
1 Frühjahr/40° SZW	.79	.12	.47
2 Sommer/26° SZW	.51	.09	.28
3 Spätsommer /40° SZW	.58	.08	.25

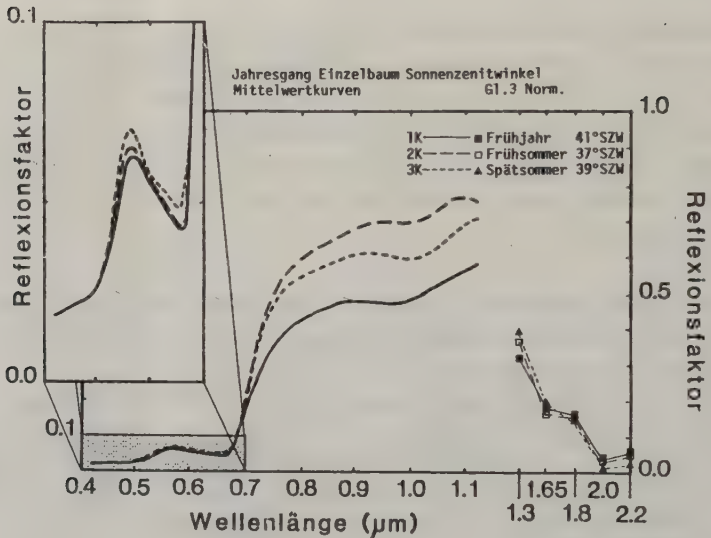
Tab.20: Quotienten zur Reflexion von Fichten im Jahresgang
gemessen bei gleicher Tageszeit mit 45° MZW

Für den Quotienten 660 nm/570 nm lag dagegen durch den Farbeinfluß der jungen Nadeln für Sommer der kleinste Wert vor.

5.2.2.2 Messungen zum Jahresgang der Reflexion von Fichten bei gleichem Sonnenzenitwinkel

Für diese Auswertung der Reflexionsmessungen durfte der Sonnenzenitwinkel nicht mehr als 4° variieren. Die Erstellung der Mittelwertkurven erfolgte nach dem gleichen Verfahren, wie es für die Messungen zum Jahresgang der Reflexion bei gleicher Tageszeit angewandt wurde.

Die in Abb.75 dargestellten Reflexionskurven zeigen im **sichtbaren Wellenlängenbereich** kaum Abweichungen zwischen der Frühjahrs-, Sommer- und Spätsommerkurve.



MITTLERE VARIANZ		Kurve Nr.		
		1	2	3
VIS	(0.4-0.7 μm):	.00177	.00016	.00014
NIR	(0.7-1.13 μm):	.07979	.00432	.00712
SWIR	(1.3 μm):	.00899	.0037	.01566
	(1.65 μm):	.00421	.00152	.00358
	(1.8 μm):	.00334	.00163	.00241
	(2.0 μm):	.00038	.00069	.00003
	(2.2 μm):	.00116	.01062	.00007

Abb.75: Reflexion von Fichten im Jahresgang gemessen bei gleichem Sonnenzenitwinkel

Erst die Vergrößerung im Sichtbaren macht die etwas geringere Reflexion im Grünen (0,5 μm - 0,6 μm) für die Frühjahrskurve im Vergleich zu den Sommerkurven deutlich. Im sichtbaren Wellenlängenbereich zeigen damit die Mittelwertkurven zum Jahresgang der Reflexion bei gleichem Sonnenstand ein ähnliches Reflexionsverhalten, wie es für die Mittelwertkurven zum Jahresgang der Reflexion bei gleicher Tageszeit beobachtet werden konnte.

Im **nahen Infrarot** ergeben sich für Messungen bei ähnlichem Sonnenzenitwinkel die höchsten Reflexionswerte im Sommer (Juni), während die Spätsommerwerte (August/September) im Vergleich dazu nun niedriger liegen. Die Frühjahrskurve (April) weist weiterhin die geringste Reflexion auf. Bei vergleichbarem Sonnenzenitwinkel liegen somit im nahen Infrarot ähnliche

Reflexionsveränderungen im Jahresgang vor, wie sie im Labor beobachtet werden konnten.

Im **kurzwelligen Infrarot** liegen kaum Reflexionsunterschiede vor. Dies könnte darauf zurückzuführen sein, daß durch die Angleichung des Sonnenzenitwinkels eine in etwa vergleichbare Beleuchtungssituation in der Baumkrone gegeben war und damit nur die wenig veränderten blattspezifischen Parameter wirksam wurden. Die etwas geringere Reflexion bei $1,3 \mu\text{m}$ und die leicht erhöhte Reflexion bei $2,0 \mu\text{m}$ und $2,2 \mu\text{m}$ der Frühjahrskurve weist auf den jahreszeitlichen Unterschied in der Benadelungsdichte hin.

Die hier präsentierten Ergebnisse zeigen, daß die bei etwa gleichen Einstrahlungsverhältnissen im Gelände festgestellten pflanzentypischen Reflexionsveränderungen im Jahresrhythmus denjenigen entsprechen, die im Labor erhalten wurden. Bei ungleichen Einstrahlungsverhältnissen können diese pflanzentypischen Reflexionsveränderungen jedoch überlagert werden.

Die **Quotienten** zeigen bei gleichem Sonnenzenitwinkel die geringsten Werte für die Sommer- bzw. Spätsommernmessungen, d.h. auch bei dieser Auswertung erscheint durch den Quotienten die Vegetation im Sommer und im Spätsommer (HORLER 1983) in ihrer Vitalität in etwa vergleichbar (vgl. Tab. 21).

Kurve Nr.	Quotient 660 nm/570 nm	Quotient 660 nm/820 nm	Quotient 1650 nm/1100 nm
1 Frühjahr/41° SZW	.76	.16	.31
2 Sommer/34° SZW	.58	.10	.22
3 Spätsommer /39° SZW	.59	.11	.27

Tab.21: Quotienten zur Reflexion der Fichte im Jahresgang
gemessen bei gleichem Sonnenzenitwinkel

Die Analyse der **Minima und Maxima** ergab für die Frühjahrskurve eine Verschiebung des Reflexionsminimums ($0,9 \mu\text{m} - 1,0 \mu\text{m}$) zu kürzeren Wellenlängenbereichen hin (vgl. Tab. A8 im Anhang).

Die in Abb.76 gezeigten Mittelwertkurven zur Reflexion von Fichten im Jahresgang bei gleichem Sonnenzenitwinkel mit 45° MZW bestätigen das schon bei 0° MZW beobachtete Reflexionsverhalten. Die Reflexionskurven für die Sommer- und Spätsommermessungen liegen im **sichtbaren Wellenlängenbereich** und **nahen Infrarot** deutlich über den Aprilmessungen, während im **kurzwelligen Infrarotbereich** die erhöhte Reflexion für die Frühsommermessungen von dem bei 0° MZW beobachteten Reflexionsverhalten abweicht.

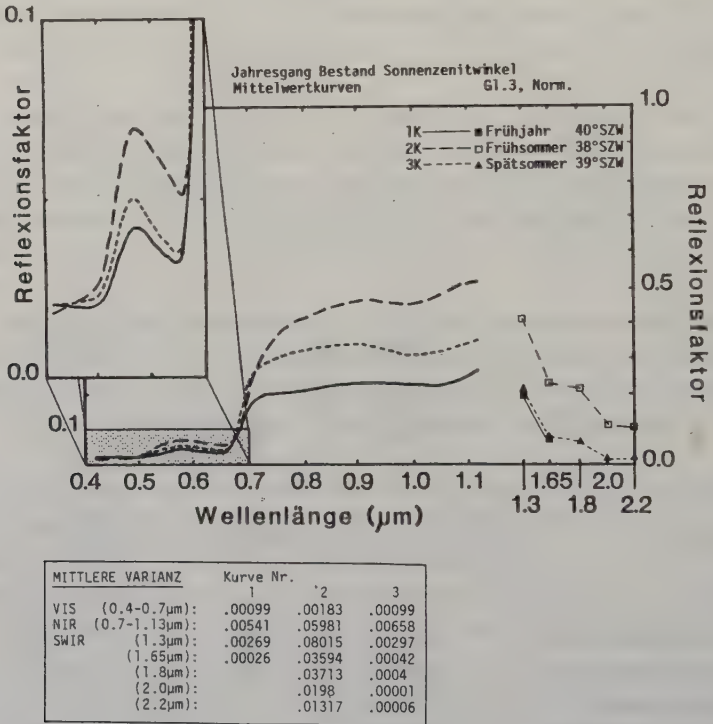


Abb.76: Reflexion von Fichten im Jahresgang gemessen bei gleichem Sonnenzenitwinkel und mit 45° MZW

Betrachtet man die **Quotienten**, so zeigen diese für 660 nm/570 nm erwartungsgemäß den kleinsten Wert im Sommer, während der Quotient 660 nm/820 nm für Sommer- und Spätsommersmessung gleich ist (vgl. Tab.22).

Kurve Nr.	Quotient 660 nm/570 nm	Quotient 660 nm/820 nm	Quotient 1650 nm/1100 nm
1 Frühjahr/41° SZW	.78	.16	.35
2 Sommer /38° SZW	.68	.10	.44
3 Spätsommer /39° SZW	.71	.10	.23

Tab.22: Quotienten zur Reflexion von Fichten im Jahresgang
gemessen bei gleichem Sonnenzenitwinkel und mit 45° MZW

Der Quotient 1650 nm zu 1100 nm zeigt jedoch, wie schon für die Schrägmessungen bei gleicher Tageszeit beobachtet werden konnte, für die Sommermessungen den höchsten Wert an. Dies bedeutet, daß der Anstieg der Reflexion im kurzwelligen Infrarot stärker sein muß als im nahen Infrarot. Es ist anzunehmen, daß dieser Effekt auf die Reflexionsgeometrie zurückzuführen ist.

5.2.2.3 Messungen zum Jahresgang der Reflexion bei Buche

Die an Buchen durchgeführten Geländemessungen zum Jahresgang wurden von Mai bis September vorgenommen. Aufgrund schlechter Wetterbedingungen konnten jedoch nur 3 Tage in die Auswertung einbezogen werden. Der Sonnenzenitwinkel schwankt für die in die Auswertung einbezogenen Messungen um 3°. Es kann somit davon ausgegangen werden, daß eine Beeinflussung durch unterschiedliche Einstrahlungsverhältnisse nicht oder nur in sehr geringem Maße vorliegt.

Abb.77 zeigt deutlich für die Messung kurz nach Blattaustrieb im Frühjahr (Mai) erhöhte Reflexionswerte **im Sichtbaren** und **nahen Infrarot**. Für die Sommermessungen (Juli und August) kann dann - im Vergleich zur Frühjahrskurve - ein deutlicher Reflexionsrückgang beobachtet werden. Dieser Rückgang korreliert mit dem Nachdunkeln der Blätter und mit den durch die dichtere Belaubung verursachten dunkleren Schatten in der Krone.

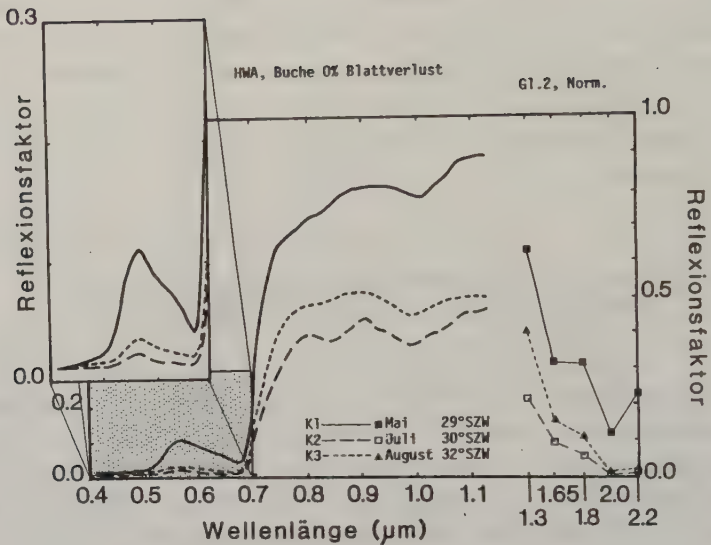


Abb.77: Reflexion von Buche im Jahresgang
gemessen bei gleichem Sonnenzenitwinkel

Auffallend ist in diesem Zusammenhang die etwas geringere Reflexion der Messung im Juli verglichen mit der im August.

Im **kurzwelligen Infrarot** zeigt die Frühjahrskurve die höchsten Reflexionswerte. Die Juli-Werte liegen wiederum etwas unter den August-Werten.

Welchem Einfluß die etwas geringere Reflexion im Juli im Vergleich zum August zuzuschreiben ist, konnte im Rahmen dieser Untersuchung nicht geklärt werden, jedoch konnte auch GATES et al. (1970) bei ähnlichen Untersuchungen an Eichenblättern einen leichten Wiederanstieg der Reflexion im Spätsommer nachweisen.

Im allgemeinen entspricht der für Buche gemessene Kurvenverlauf in etwa den Labormeßergebnissen von GATES et al. (1970) an Eichenblättern und kann deshalb als pflanzenspezifisch angesehen werden.

Die Betrachtung der **Quotienten** zeigt im Sichtbaren für die Maikurve die geringsten Werte, wie dies aufgrund der stark erhöhten Reflexion im Grünen ($0,5 \mu\text{m} - 0,6 \mu\text{m}$) anzunehmen war (vgl. Tab.23). Der Quotient $660 \text{ nm}/820 \text{ nm}$ ergibt für die Juli- und Augustkurve gleiche Werte. Dies deutet auf einen vergleichbaren Vitalitätszustand der Buchen im Sommer hin. Der für August im Vergleich zum Juli höhere Quotient für $1650 \text{ nm}/1100 \text{ nm}$ könnte im Zusammenhang mit einer beginnenden Entwässerung der Blätter stehen.

Kurve Nr.	Quotient $660 \text{ nm}/570 \text{ nm}$	Quotient $660 \text{ nm}/820 \text{ nm}$	Quotient $1650 \text{ nm}/1100 \text{ nm}$
1 (Mai)	.36	.07	.36
2 (Juli)	.54	.05	.22
3 (August)	.56	.05	.31

Tab.24: Quotienten zur Reflexion von Buche im Jahresgang

Die Analyse der **Minima und Maxima** zeigt für die Sommerkurve im Vergleich zur Maikurve eine Verschiebung des Reflexionsminimums im nahen Infrarot ($0,98 \mu\text{m} - 1,0 \mu\text{m}$) zu kürzeren Wellenlängen hin, was auch auf die bei Blattalterung zunehmende Entwässerung zurückgeführt werden könnte.

Im sichtbaren Wellenlängenbereich sind keine Verschiebungen der Minima und Maxima erkennbar (vgl. Tab.A9 im Anhang).

5.3 Veränderung der Reflexion durch Blatt- bzw. Nadelvergilbung

Die Messungen zur Vergilbung wurden, wie in Abschnitt 4.6.2 dargelegt, im Labor und Gelände durchgeführt. Ziel war es dabei nicht allein, den Einfluß der verschiedenen Vergilbungsgrade auf die Reflexion im sichtbaren Wellenlängenbereich nachzuweisen (siehe Abschnitt 3.1.1.1), sondern es sollte auch untersucht werden, wie differenziert Vergilbungsgrade über die Reflexion erfaßt werden können und inwieweit sich die Blattvergilbung auf die Rückstrahlungseigenschaften im nahen und mittleren Infrarot auswirkt.

5.3.1 Labormessungen zur Blatt- bzw. Nadelvergilbung

Im Labor wurden Messungen an einzelnen Blattorganen verschiedener Laubbaumarten sowie an Fichten- und Kiefernnadeln durchgeführt (vgl. Abschn. 4.6.3). Da für die Untersuchungen zur Vergilbung zwei spektral unterschiedlich hochauflösende Spektroradiometer verwendet wurden, ergeben sich im kurzwelligen Infrarot Abweichungen in der Kurvendarstellung zwischen Laubblättern und Nadeln. Diese Unterschiede in den Kurvenverläufen haben aber keinen Einfluß auf die vergleichende qualitative Auswertung (Abschnitt 4.3).

Wie schon dargelegt, zeigten die untersuchten Blattorgane verschiedener Laubbaumarten kaum Unterschiede in ihrer Reflexion. Die in den nachfolgenden Abbildungen dargestellten Reflexionskurven am Beispiel einzelner Laubblattarten sind daher repräsentativ für die durch Vergilbung hervorgerufenen Reflexionsveränderungen aller untersuchten Laubblattarten.

Die **Laubblätter** lassen für die Farbstufen **grün - gelb** mit zunehmendem Vergilbungsgrad im **sichtbaren Wellenlängenbereich** einen deutlichen Anstieg der Reflexion im Grünen ($0,57 \mu\text{m}$) und im Bereich der Chlorophyllabsorptionsbande (um $0,68 \mu\text{m}$) erkennen (vgl. Abb. 78).

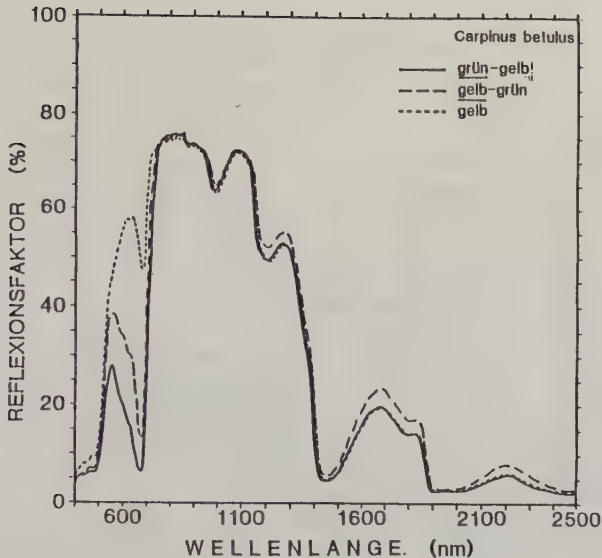


Abb.78: Reflexionskurven grüner bis gelber Laubblätter (Carpinus betulus), gemessen mit dem Perkin-Elmer Laborspektorradiometer

Dabei ist bei den als **gelb** eingestuften Blattorganen der Reflexionspeak nur noch schwach ausgeprägt und zum Rotbereich ($0,6\ \mu\text{m}$ bis $0,7\ \mu\text{m}$) hin verschoben. Durch den Rückgang der Chlorophyllabsorption ist desweiteren ein deutlicher Anstieg der Reflexionsintensität ($0,55\ \mu\text{m}$ - $0,7\ \mu\text{m}$) zu beobachten.

Im **nahen** und im **kurzwelligen Infrarot** sind die Unterschiede zwischen den Reflexionswerten **grüner bis gelber** Laubblätter vernachlässigbar gering (vgl. Abb.78).

Betrachtet man die Reflexionskurven der als **gelb - braun** eingestuften Laubblätter im Vergleich zu den als **grün** eingestuften Laubblättern in Abb.79, so kann im **sichtbaren Wellenlängenbereich** kein Reflexionspeak ($0,5\ \mu\text{m}$ - $0,6\ \mu\text{m}$) bzw. keine Absorptionsdelle ($0,6\ \mu\text{m}$ - $0,7\ \mu\text{m}$) mehr registriert werden. Die Reflexionskurven erhalten daher im sichtbaren Wellenlängenbereich das Aussehen einer zum nahen Infrarot hin steil ansteigenden Gerade.

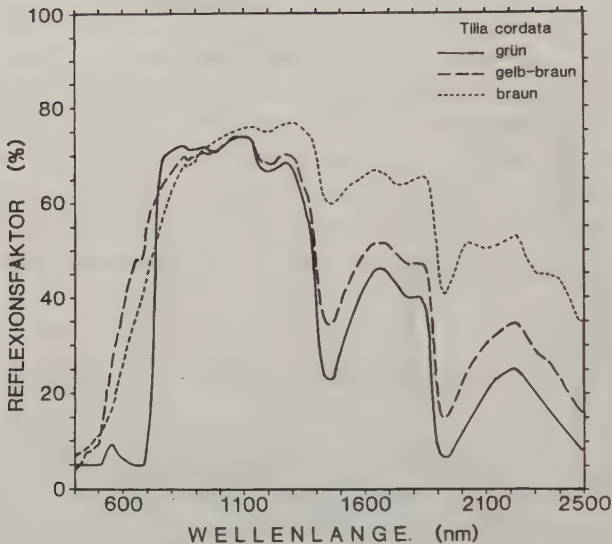
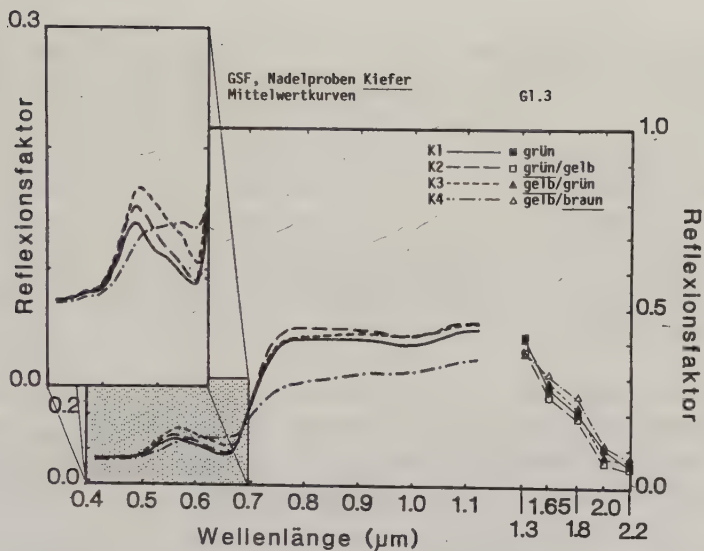


Abb.79: Reflexion gelber bis brauner Laubblätter (*Tilia cordata*) im Vergleich zu grünen Laubblättern, gemessen mit dem Perkin-Elmer Laborspektorradiometer

Im **nahen Infrarotbereich** wird von den gelb-braunen und braunen Laubblättern das Reflexionsniveau der grünen Laubblätter erreicht, bzw. von den braunen Laubblättern sogar überschritten, jedoch erst im Wellenlängenbereich um $1,0 \mu\text{m}$. Es kommt dadurch für die verbrauchten Laubblätter zur Abflachung der Reflexionsschulter im photographischen Infrarotbereich ($0,7 \mu\text{m} - 0,1 \mu\text{m}$).

Im **kurzwelligigen Infrarot** ist für die verbrauchten Laubblätter ein deutlicher Anstieg der Reflexion zu erkennen. Dieser könnte auf die Abnahme des Wassergehalts im Blatt zurückzuführen sein (TUCKER 1984).

Die Vergilbungsmessungen an **Kiefernadeln** mit dem lehrstuhleigenen Feldspektorradiometer zeigen für die Farbstufen **grün - gelb**, ähnlich wie es für die Laubblätter beobachtet werden konnte, einen Anstieg der Reflexion im **sichtbaren Wellenlängenbereich** (vgl. Abb.80).



MITTLERE VARIANZ	Kurve Nr.			
	1	2	3	4
VIS (0,4-0,7 μm):	.00000	.00002	.00000	.00000
NIR (0,7-1,13 μm):	.00000	.00046	.00002	.00000
SWIR				
(1,3 μm):	.00000	.0001	.00012	.00000
(1,65 μm):	.00000	.00011	.0001	.00000
(1,8 μm):	.00000	.0001	.00005	.00000
(2,0 μm):	.00000	.00019	.00001	.00001
(2,2 μm):	.00000	.00005	.00002	.00003

Abb.80: -Reflexionskurven grüner bis gelb-brauner Kiefernadeln (*Pinus sylvestris*) gemessen in der Photometerkugel mit dem Feldspektroradiometer

Eine qualitative Veränderung im Kurvenverlauf war mit dem Reflexionsanstieg im Grün-Rotbereich (0,5 μm - 0,7 μm) nicht verbunden.

Im **nahen Infrarot** und im **kurzwelligen Infrarot** sind keine Reflexionsveränderungen zu erkennen.

Im Gegensatz dazu wird für die als **gelb-braun** eingestuftten Nadeln im **sichtbaren Wellenlängenbereich** ein erheblicher Reflexionsrückgang im Grünen (um 0,55 μm) bei gleichzeitigem Anstieg der Reflexion im Rotbereich (0,6 μm - 0,7 μm) beobachtet. Da das Reflexionsniveau im Grünen ab 0,57 μm damit in etwa dem Rotbereich entspricht, ist der Kurvenverlauf zwischen 0,57 μm und 0,7 μm nahezu linear.

Im gesamten **nahen Infrarot** sinkt die Reflexion der **gelb-braunen** Nadeln im Vergleich zu den grün-gelben deutlich ab und zeigt damit ein von den gelb-braun eingestuften Laubblättern abweichendes Verhalten. Dieser Rückgang der Reflexion gelb-brauner Kiefernadeln könnte auf die von SCHMITT et al. (1986) und BRAUN et al. (1986) bei gelben Nadeln nachgewiesenen Veränderungen der Mesophyllzellen durch Destrukturierung des Cytoplasmas, Lumenverringern und Kollabieren einzelner Zellen zurückzuführen sein, es ist jedoch auch möglich, daß Unterschiede in der Farbhelligkeit auf die Reflexion im nahen Infrarot gewirkt haben.

Im **kurzwelligen Infrarot** ist ab 1,65 μm bei genauer Betrachtung ein leichter Anstieg der Reflexion für **gelb-braune** Nadeln im Vergleich zu den grünen Nadeln erkennbar. Dieser leichte Anstieg deutet auf die Entwässerung der als gelbbraun eingestuften Nadeln hin.

Bei allen **Quotienten** zeigen sich für die als grün-gelb eingestuften Nadeln die geringsten Werte (vgl. Tab.24).

Kurve Nr.	Quotient	Quotient	Quotient
	660 nm/570 nm	660 nm/820 nm	1650 nm/1100 nm
1 (grün)	.67	.22	.62
2 (grün-gelb)	.64	.21	.54
3 (gelb-grün)	.71	.27	.60
4 (gelb-braun)	1.10	.45	.79

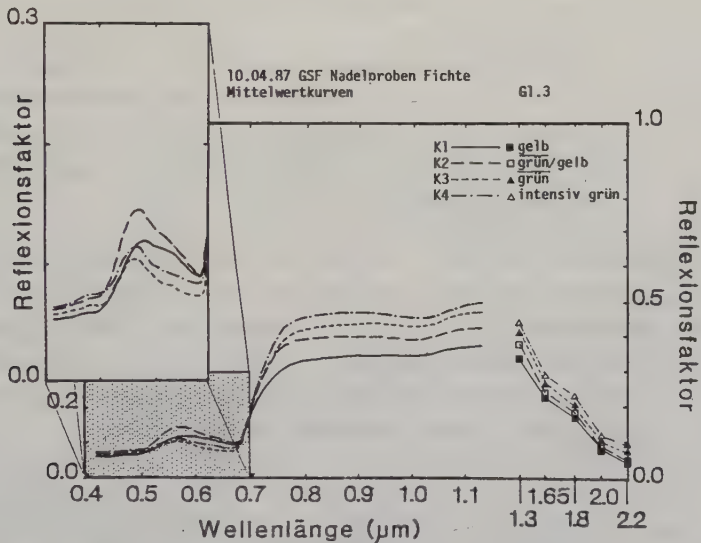
Tab.24: Quotienten zur Reflexion vergilbter Kiefernadeln

Für den Quotienten 660 nm/820 nm ist jedoch der Unterschied zwischen den als grün und den als grün-gelb eingestuften Nadeln so gering, daß nach dem Quotienten Nadeln beider Vergilbungsgrade als vital gelten können.

Die Analyse der **Minima und Maxima** ergibt im Sichtbaren mit zunehmender Vergilbung eine deutliche Verschiebung des Reflexionspeaks zu größeren Wellenlängenbereichen.

Im nahen Infrarot verschiebt sich das Reflexionsminimum ($0,98\mu\text{m} - 1,0\mu\text{m}$) mit Zunahme des Vergilbungsgrades zu kürzeren Wellenlängenbereichen hin. Für die als gelb-braun eingestuften Nadeln war die Wasserabsorptionsdelle nicht mehr nachzuweisen. Dies entspricht den bisher gemachten Beobachtungen bei einer Vitalitätsminderung der Blattorgane bzw. Bäume (vgl.Tab. A10 im Anhang).

Die Untersuchungen an **Fichtennadeln** zeigen, ebenso wie dies für Kiefer beobachtet werden konnte, mit zunehmender Vergilbung für die Farbstufen **grün** bis **grün-gelb** einen Anstieg der Reflexion im sichtbaren Wellenlängenbereich (vgl. Abb.81).



MITTLERE VARIANZ		Kurve Nr.			
		1	2	3	4
VIS	(0.4-0.7 μm):	.00174	.00015	.00000	.00000
NIR	(0.7-1.13 μm):	.02236	.00043	.00137	.00000
SWIR	(1.3 μm):	.02247	.00011	.00313	.00000
	(1.65 μm):	.01034	.00000	.00263	.00000
	(1.8 μm):	.00603	.00000	.00255	.00000
	(2.0 μm):	.00148	.00005	.0014	.00001
	(2.2 μm):	.00057	.00012	.00101	.0001

Abb.81: Reflexionskurven grüner bis gelber Fichtennadeln (*Picea abies*), gemessen in der Photometerkugel mit dem Feldspektorradiometer

im **nahen Infrarot** konnte - im Gegensatz zur Kiefer - schon für die Farb-stufen **grün-gelb** und **gelb-grün** ein leichter Rückgang in der Reflexion beobachtet werden. Dies deutet darauf hin, daß der für die Kiefer erst bei **gelb-braunen** Nadeln beschriebene Effekt, nämlich die Veränderung der Zellstruktur für Fichtennadeln bereits bei leichterer Verfärbung vorliegen könnte. Dies wird auch durch Untersuchungen von SCHMITT et al. (1986) bestätigt, da sie schon an **grünen** Nadeln geschädigter Fichten eine Lumenverringerng und Kondensierung des Cytoplasmas nachweisen konnten.

Im **kurzwelligem Infrarot** können noch keine Veränderungen nachgewiesen werden. Dies ist evtl. darauf zurückzuführen, daß die Verbraunung der Fichtennadeln nicht ebenso deutlich war wie die der Kiefernadeln.

Für **gelbe** Fichtennadeln werden dieselben Reflexionsveränderungen beobachtet wie für die Kiefer, d.h. ein Rückgang der Reflexion im **Grünbereich** ($0,5 \mu\text{m} - 0,6 \mu\text{m}$), ein Anstieg im **Rotbereich** ($0,6 \mu\text{m} - 0,7 \mu\text{m}$) und eine Abschwächung der Reflexion im **nahen Infrarot**. Der **kurzwellige Infrarotbereich** ist bei **gelben** Fichtennadeln kaum beeinflusst.

Die **Quotienten** für $660 \text{ nm}/570 \text{ nm}$ zeigen den geringsten Wert für die als **grün-gelb** eingestuften Proben. Für $660 \text{ nm}/820 \text{ nm}$ wird der kleinste Wert für die **grünen** Nadeln registriert. Für den Quotienten $1650 \text{ nm}/1100 \text{ nm}$ kann keine einheitliche Tendenz festgestellt werden. Da bei diesen Untersuchungen keine Schatteneinflüsse vorliegen können, sind möglicherweise Unterschiede im Wassergehalt dafür verantwortlich (vgl. Tab.25).

Kurve Nr.	Quotient $660 \text{ nm}/570 \text{ nm}$	Quotient $660 \text{ nm}/820 \text{ nm}$	Quotient $1650 \text{ nm}/1100 \text{ nm}$
1 (ingensiv grün)	.75	.18	.54
2 (grün)	.72	.17	.61
3 (grün-gelb)	.69	.25	.57
4 (gelb)	.80	.28	.61

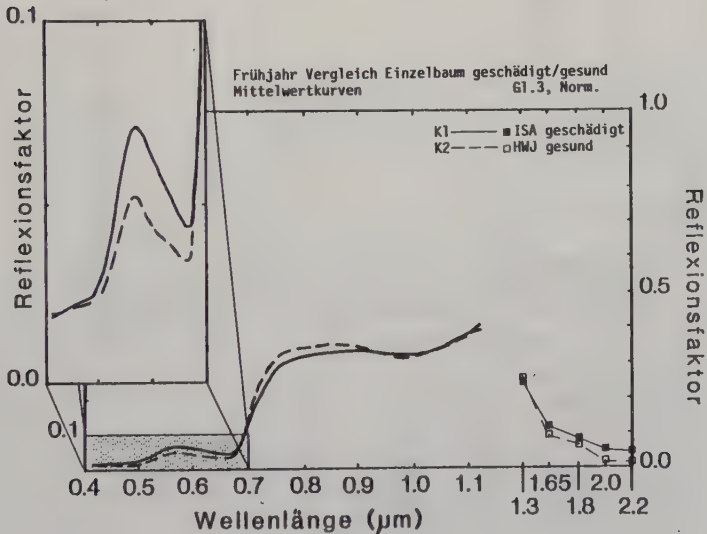
Tab.25: Quotienten zur Reflexion grüner und vergilbter Fichtennadeln

Bei den **Minima und Maxima** kann, wie bei der Kiefer, für die **gelb-grünen** Fichtennadeln im sichtbaren Wellenlängenbereich eine Verschiebung der Reflexionspeaks zu längeren Wellenlängenbereichen, sowie im nahen Infrarot die Verlagerung der Absorptionsdelle zu kürzeren Wellenlängenbereichen hin beobachtet werden (vgl. Tab. A 11 im Anhang).

5.3.2 Geländeuntersuchungen zur Blatt- bzw. Nadelvergilbung

Die Messungen im Gelände wurden an einem deutlich vergilbten, mit Nadelverlust (20 %) gekennzeichneten (vgl. Abb. 56) und an einem vital und dunkelgrün wirkenden Fichtenjungbestand (vgl. Abb. 54) im Verlauf der Vegetationsperiode durchgeführt.

Im sichtbaren Wellenlängenbereich zeigt die über den vergilbten Bäumen gemessene Reflexion im Vergleich zu der über grünen Bäumen im Frühjahr die deutlichsten Unterschiede. Wie in Abb. 82 zu sehen, wird der Vergilbungseffekt durch die erhöhte Reflexion im Grünen ($0,5 \mu\text{m} - 0,6 \mu\text{m}$) deutlich.

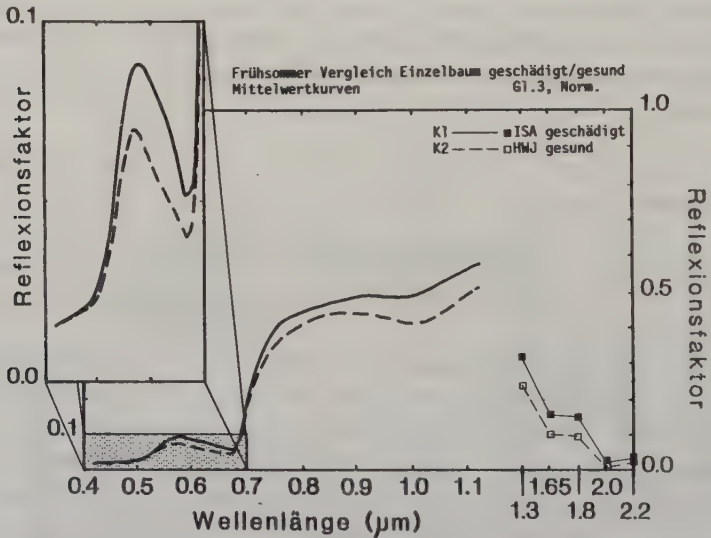


MITTLERE VARIANZ	Kurve Nr.	
	1	2
VIS (0.4-0.7μm):	.00001	.00002
NIR (0.7-1.13μm):	.00015	.0005
SWIR (1.3μm):	.00011	.00023
(1.65μm):	.00003	.00002
(1.8μm):	.00006	.00003
(2.0μm):	.00039	.00002
(2.2μm):	.00018	.00005

Abb.82: Reflexion von grünen und gelben Fichten im Frühjahr (Gelände)

Im **nahen** und **kurzwelligen Infrarot** liegen zwar für grüne und vergilbte Bäume keine deutlichen Reflexionsunterschiede vor, allerdings konnte ein leichtes Abflachen der Reflexionsschulter bei gleichzeitig leicht erhöhten Reflexionswerten zwischen 1,65 μm und 2,2 μm beobachtet werden.

Im **Frühsummer** (Mai/Juni) ist der Reflexionsanstieg für die vergilbten Bäume im Vergleich zu den grünen Bäumen im **sichtbaren Wellenlängenbereich** noch gut zu erkennen (vgl. Abb. 83).



MITTLERE VARIANZ		Kurve Nr.	
		1	2
VIS	(0.4-0.7 μm):	.00012	.00000
NIR	(0.7-1.13 μm):	.00771	.00026
SWIR	(1.3 μm):	.00377	.00134
	(1.65 μm):	.00148	.00034
	(1.8 μm):	.00174	.00023
	(2.0 μm):	.00026	.00001
	(2.2 μm):	.00037	.00003

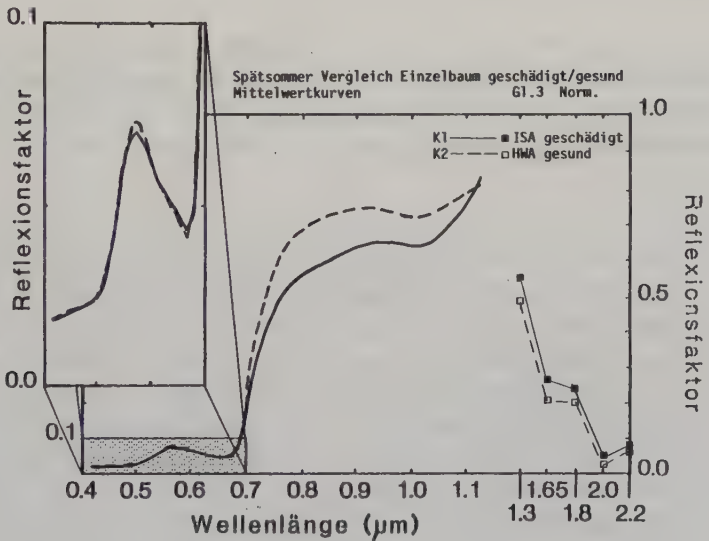
Abb.83: Reflexion von grünen und gelben Fichten gemessen im Frühsummer (Gelände)

Im Gegensatz zum vorher gezeigten Verlauf für das Frühjahr sind jedoch nun im nahen Infrarot und kurzwelligen Infrarot bis 1,8 μm für die vergilbten Bäume erhöhte Reflexionswerte im Vergleich zu grünen Bäumen festzustellen.

Da die Spektralkurven bei $2,0\ \mu\text{m}$ und $2,2\ \mu\text{m}$ keinen Unterschied in der Reflexion mehr erkennen lassen, kann die hier beobachtete Abschwächung der Reflexion des gesunden Bestandes im Vergleich zum vergilbten Bestand wohl auf den dichter bewachsenen Untergrund und auf die hellere Nadelfarbe (Mehrfachreflexion in der Krone) des letzteren zurückzuführen (vgl. Abschn. 4.5).

Der hier besonders deutlich durchschlagende Einfluß des Untergrundes könnte dadurch bewirkt worden sein, daß die Messungen kurz nach Austrieb, d.h. im Vergleich zum Spätsommer bei weniger Nadelmasse durchgeführt worden sind.

Betrachtet man nun die im **Spätsommer vorgenommenen Messungen**, so ist - wie in Abb. 84 gezeigt - zwischen den Bäumen des vergilbten Bestandes und denjenigen des grünen Bestandes im **sichtbaren Wellenlängenbereich** kein Reflexionsunterschied mehr erkennbar.



MITTLERE VARIANZ		Kurve Nr.	
		1	2
VIS	(0.4-0.7µm):	.00019	.00006
NIR	(0.7-1.1µm):	.02384	.00796
SWIR	(1.3µm):	.00631	.01892
	(1.65µm):	.04305	.00452
	(1.8µm):	.01385	.00551
	(2.0µm):	.001	.00027
	(2.2µm):	.00273	.00122

Abb.84: Reflexion von grünen und ehemals vergilbten Fichten, gemessen im Spätsommer (Gelände)

Diese im Sichtbaren etwa gleiche Reflexionsintensität der Bäume aus beiden Versuchsbeständen ist durch den Rückgang der Vergilbung während der Sommermonate erklärbar.

Im **nahen Infrarot** kann im Gegensatz zur Frühsommernessung nun für die Bäume des vitalen Bestandes ein Anstieg der Reflexion im Vergleich zu den Bäumen des geschädigten Bestandes festgestellt werden. Da die vitalen, grünen Bäume dichter benadelte Kronen hatten, ist anzunehmen, daß dieser Anstieg auf mehr Nadelmasse im Meßausschnitt (vgl. MYERS 1970), und auf den damit nun weniger wirksamen Einfluß des dunklen Untergrundes zurückzuführen ist (vgl. Abschnitt 5.1). Desweiteren ist natürlich durch den Rückgang der Vergilbung der Unterschied in der Farbhelligkeit auf die Reflexion nicht mehr in derselben Weise wirksam. Die Reflexionsunterschiede im **kurzwelligen Infrarot** sind vernachlässigbar gering.

Die **Quotienten** 660 nm/570 nm für die im **Frühjahr** durchgeführten Messungen zeigen im Sichtbaren den geringeren Wert für den vergilbten Bestand (Pigmentierung). Für den Quotienten 660 nm/820 nm und 1650 nm/1100 nm liegen für den vitaleren Bestand kleinere Werte vor (vgl. Tab. 26).

Kurve Nr.	Quotient 660 nm/570 nm	Quotient 660 nm/820 nm	Quotient 1650 nm/1100 nm
1 (JSA*, Frühjahr)	.58	.13	.30
2 (HWJ**, Frühjahr)	.62	.10	.24
1 (JSA, Frühsommer)	.55	.12	.27
2 (HWJ, Frühsommer)	.56	.10	.20
1 (JSA, Spätsommer)	.58	.07	.50
2 (HWJ, Spätsommer)	.52	.05	.25

Tab.26: Quotienten zur Reflexion grüner und vergilbter Fichten im Verlauf der Vegetationsperiode

* ISA: geschädigter Fichtenbestand in den ISARAUE
 ** HWJ: vitaler Fichtenbestand im HÖGLWALD

Im **Frühsommer** ist der Quotient 660 nm/570 nm für die beiden Bestände in etwa gleich (Rückgang der Vergilbung), für die Quotienten 660 nm/820 nm und 1650 nm/1100 nm können wiederum für den vitalen Bestand die geringsten Werte registriert werden.

Im **Spätsommer** schließlich zeigen alle Quotienten für den grünen, vitalen Bestand die geringsten Werte an.

Trotz des im Jahresablauf unterschiedlichen Verhaltens der Reflexionskurven des vitalen und vergilbten Bestandes zeigt der **Quotient 660/820 nm konsequent** für die Bäume des vitalen, grünen Bestandes die geringsten Werte an. Nach den Untersuchungen von HORLER (1983) würde dies auf erhöhte Vitalität hinweisen und damit im Einklang mit der visuellen Ansprache stehen.

Die Analyse der **Minima und Maxima** läßt im sichtbaren Wellenlängenbereich vom Frühjahr zum Sommer eine Verschiebung des Reflexionsmaximums im Grünen ($0,5 \mu\text{m} - 0,6 \mu\text{m}$) von längeren zu kürzeren Wellenlängenbereichen hin erkennen.

Im nahen Infrarot ist während der Vegetationsperiode mit zunehmender Vitalität der Einzelbäume eine Verlagerung des Reflexionsminimums bei $0,98 \mu\text{m}$ zu längeren Wellenlängenbereichen hin zu beobachten. Auffallend ist dabei, daß die Verlagerung der Absorptionsdelle für die vitalen, grünen Bäume schon im **Frühsommer** zu erkennen ist, während für den vergilbten Bestand diese Verschiebung erst im **Spätsommer** nachgewiesen werden kann (vgl. Tab. A 12 im Anhang).

5.4 Veränderung der Reflexion durch Trockenstreß

Um den qualitativen und quantitativen Einfluß von Trockenstreß auf die Reflexion von Nadelbäumen erfassen zu können, wurden im Sommer 1986 zusammen mit amerikanischen Kollegen die in Abschnitt 4.6.5 beschriebenen Geländeexperimente durchgeführt. Wie bei allen anderen Versuchen, erfolgten parallel dazu Vergleichsmessungen im Labor.

Die Reflexionsmessungen zum Trockenstreß wurden ausschließlich an Fichte durchgeführt. Bei allen hier dargelegten Untersuchungen ist der Trockenstreß künstlich erzeugt und durch Gewichtsvergleich bzw. Wasserpotentialmessungen quantifiziert worden (vgl. Abschnitt 4.6.4).

5.4.1 Labormessungen zum Trockenstreß

Wie in Abschnitt 4.6.4 beschrieben, wurden für die Laboruntersuchungen zum Trockenstreß zwei Versuchsansätze durchgeführt:

- Austrocknung von Bäumchen durch Abschneiden des Stammes und
- Messungen über langsam austrocknenden Nadeln und Zweigen.

Für die Messungen an Bäumchen mußte der dunkel gehaltene Untergrund als zusätzlicher Einflußfaktor auf die Reflexion miteinbezogen werden, während bei den Messungen der Nadeln ausschließlich nadelspezifische Parameter auf die Reflexion einwirkten.

5.4.1.1 Labormessungen an Fichtenbäumchen zum Trockenstreß

Die Trockenstreßuntersuchungen an Bäumchen wurden mehrmals für unterschiedlich lange Zeitperioden durchgeführt. Pro Versuchsgruppe standen jeweils 2 Bäumchen zur Verfügung, ein Kontroll- und ein Streßbäumchen (vgl. Abschnitt 4.6.4). Wie in Abb.85 zu sehen, lassen die ersten Trockenstreßversuche über einen Zeitraum von 48 Stunden im gesamten Meßbereich **keine Reflexionsveränderungen** für das Streßbäumchen erkennen.

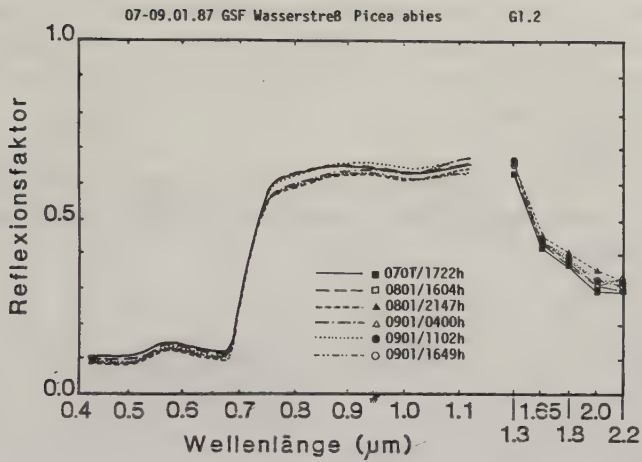


Abb.85: Reflexion von Fichtenbäumchen (4j.) gemessen vor, während und nach 48 Stunden Trockenstreß

Auch äußerlich waren dem Streßbäumchen im Vergleich zum gut wasserver- sorgten Bäumchen keine Veränderungen anzusehen (vgl. Abb.86).

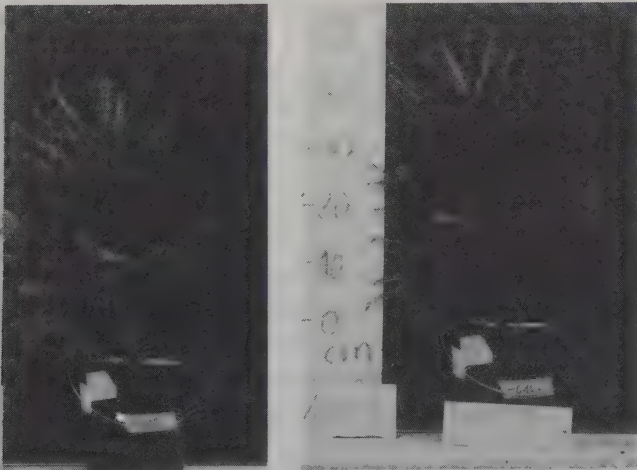


Abb.86: Fichtenbäumchen vor und nach 48 Stunden Trockenstreß

Parallel zu den Trockenstreßversuchen über einen Zeitraum von 48 Stunden wurde am Lehrstuhl für Frostbotanik und Pflanzenphysiologie der Universität München das osmotische Potential der Nadeln für die unterschiedlich lang gestreßten Bäume bestimmt.

Wie in Tab.27 dargestellt, zeigen die Nadeln des nichtgestreßten Baumes im Vergleich zu denen des gestreßten Baumes deutliche Unterschiede im osmotischen Potential.

Trockenstreßdauer	Osmotisches Potential π	
	Streßbaum	Kontrollbaum
0 Std.	π -21.14 bar	π -21.26 bar
22 - 24 Std.	π -25.07 bar	π -21.75 bar
46 - 48 Std.	π -29.20 bar	π -19.45 bar

Tab.27: Mittleres osmotisches Potential der Kontroll- und Streßbäumchen vor Beginn des Trockenstreßversuchs, nach 22 Std. und nach 48 Std. Trockenstreß (nach DOBNER 1986)

Auch anhand der **Quotienten** und der **Minima und Maxima** können keine Reflexionsveränderungen beobachtet werden (vgl. Tab. A 13 im Anhang).

Dies bedeutet, daß trotz der Veränderung im osmotischen Wert eine Reaktion der Reflexion nach 48 Std. Trockenstreß noch nicht nachzuweisen war. Unterschiede ergeben sich - wie noch gezeigt wird - offensichtlich erst bei fortgeschrittener Streßsituation.

Da bei den weiteren Untersuchungen zum Trockenstreß an Bäumchen keine Möglichkeit mehr bestand, das osmotische Potential der Nadeln bestimmen zu lassen, erfolgte deshalb die Quantifizierung des Wasserverlustes über die Gewichtsbestimmung. Bei der für die Folgeexperimente zunehmenden Versuchsdauer waren auch Veränderungen in der Kronenstruktur zu erkennen, die als zusätzliche Einflußfaktoren auf die Reflexion wirkten.

In Abb. 87 ist die Reflexion der Streßbäumchen vor Beginn, in der Mitte und am Ende des Trockenstreßversuchs dargestellt.

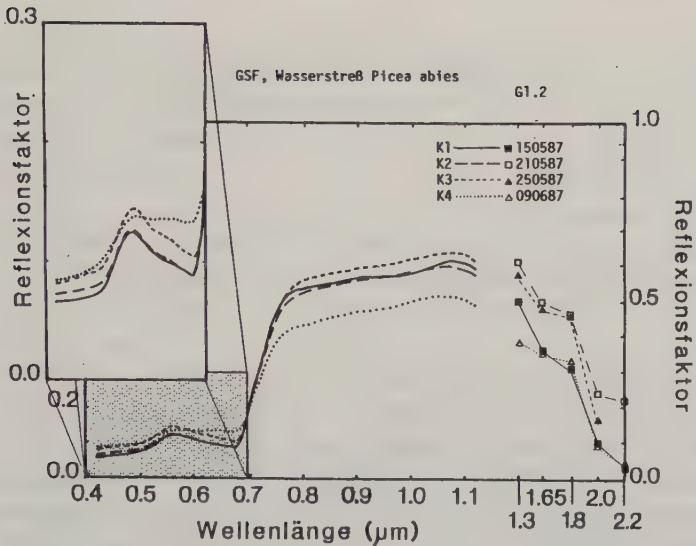


Abb.87: Veränderung der Reflexion für Fichtenbäumchen (4j.) während eines 25tägigen Trockenstreßversuchs

Erste Veränderungen in der Reflexion sind im **kurzwelligen Infrarotbereich** nach etwa **5-6 Tagen** Trockenstreß zu beobachten. Wie in Abb.87 dargestellt, ist für das Streßbäumchen ein deutlicher Anstieg der Reflexion im Wellenlängenbereich zwischen 1,3 µm und 2,2 µm zu erkennen. Im **Sichtbaren** und im **nahen Infrarot** sind währenddessen keine Veränderungen zu beobachten. Nach etwa **10 Tagen** Trockenstreß wird im **sichtbaren Wellenlängenbereich** und **nahen Infrarot** ein Reflexionsanstieg beobachtet, während im **kurzwelligen Infrarot** die Reflexion fast unverändert hoch bleibt.

Nach etwa 25 Tagen wird eine Abflachung des Reflexionspeaks im Grünen, bei gleichzeitigem Anstieg der Reflexion im Rotbereich beobachtet. Im **nahen Infrarot** und im **kurzwelligen Infrarot** ist ein Reflexionsrückgang zu erkennen. Dieser Reflexionsrückgang dürfte im nahen Infrarot auf den zunehmenden Einfluß der veränderten Nadelstellung bzw. den durchscheinenden Untergrund zurückzuführen sein. Für den kurzwelligen Infrarotbereich könnte der Rückgang auch durch die veränderte Nadelstellung oder durch das reflektierende Rindenmaterial verursacht worden sein.

Die **Quotienten** 660 nm/570 nm und 660 nm/820 nm zeigen mit zunehmendem Trockenstreß des Bäumchens zunächst keine Veränderung, erst ab Mitte (10 Tage) und gegen Ende (24 Tage) des Versuchs ist ein Anstieg der Werte zu erkennen (vgl. Tab.28).

Kurve Nr.	Quotient 660nm/570nm	Quotient 660nm/820nm	Quotient 1650nm/1100nm	Quotient 1800nm/1650nm
1 (15.5.87)	.72	.17	.59	.87
2 (21.5.87)	.72	.17	.84	.93
3 (25.5.87)	.74	.29	.75	.95
4 (9.6.87)	.95	.30	.69	.95

Tab.28: Quotienten zur Reflexion von Fichtenbäumchen
bei Trockenstreß

Für 1650 nm/1100 nm steigt der Quotient mit zunehmendem Trockenstreß zunächst an, fällt dann aber gegen Ende des Versuchszeitraums wieder ab. Dieser Verlauf zeichnet den bereits beschriebenen Verlauf, nämlich den Anstieg und anschließend den Rückgang der Reflexion im kurzwelligen Infrarot sehr gut nach. Für den zu Trockenstreßuntersuchungen hinzugenommenen Quotienten 1800 nm/1650 nm ist ein Anstieg der Werte zu registrieren.

Für die **Minima und Maxima** im Sichtbaren, sind keine Verschiebungen nachzuweisen. Mit zunehmenden Streß ist die Wasserabsorptionsdelle nicht mehr zu erkennen (vgl. Tab. A 14 im Anhang).

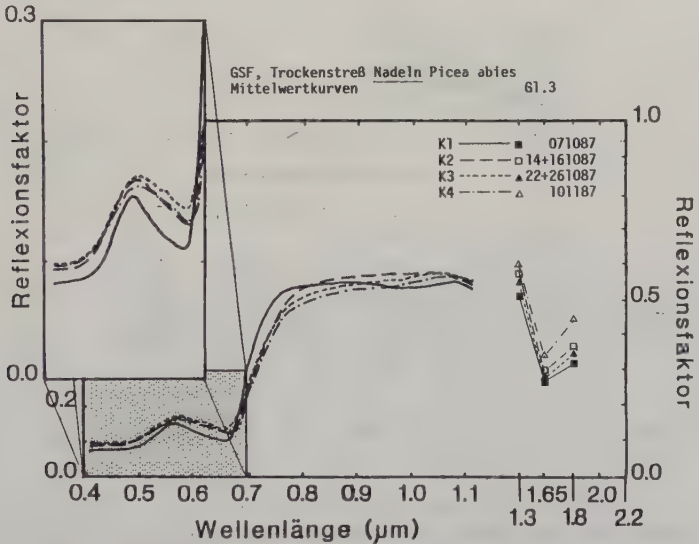
5.4.1.2 Labormessungen zum Trockenstreß an Fichtennadeln und -zweigen

Für die im Rahmen des Trockenstreßversuchs durchgeführten Messungen über Bäumchen konnte nicht zwischen den nadelspezifischen Einflußparametern und dem vom Untergrund bzw. von der Kronenstruktur ausgehenden Einfluß auf die Reflexion unterschieden werden. Es wurden deshalb auch Reflexionsmessungen an Nadeln und Zweigen durchgeführt (vgl. Kap. 4.6.4), welche die ausschließliche Erfassung des nadelspezifischen Einflusses auf die Reflexion ermöglichten. Bei diesen Untersuchungen sind parallel zu den Reflexionsmessungen jedesmal die Gewichtsveränderungen der Nadeln und Zweige bestimmt worden.

Wie in Abb. 88a dargestellt, ist mit zunehmender Austrocknung der **Nadeln** zunächst im **sichtbaren Wellenlängenbereich** ein kontinuierlicher Anstieg der Reflexion im Grünbereich (0,5 µm - 0,6 µm) zu erkennen, bei gleich-

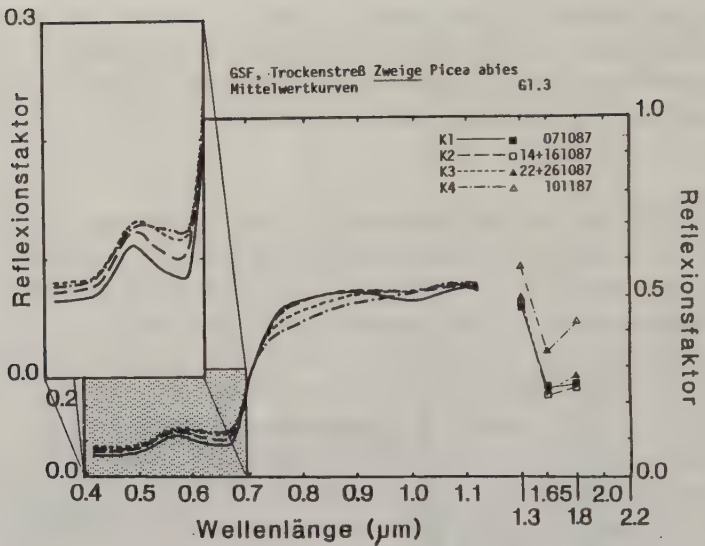
zeitigem Rückgang der Absorption im Roten ($0,6\ \mu\text{m} - 0,7\ \mu\text{m}$). Erst für die letzte Messung bzw. nach 34 Tagen Trockenstreß und weitgehender Austrocknung der Nadeln kann ein Abflachen des Reflexionspeaks ($0,57\ \mu\text{m}$) beobachtet werden. Für die **Zweige** (vgl. Abb. 88b) ist in etwa das gleiche Reflexionsverhalten zu beobachten.

Die relativ geringe Veränderung der Reflexion im Grünbereich scheint erklärbar, da der Trockenstreß die Nadeln nur blaß-grün verfärbte. Der Anstieg der Reflexion im Rotbereich ($0,6\ \mu\text{m} - 0,7\ \mu\text{m}$) weist auf eine deutliche Beeinträchtigung der Chlorophyllabsorption hin.



MITTLERE VARIANZ		Kurve Nr.			
		1	2	3	4
VIS	(0.4-0.7 μm):	.00000	.00002	.00000	.00000
NIR	(0.7-1.13 μm):	.00002	.00012	.00001	.00000
SWIR	(1.3 μm):	.00000	.00125	.00000	.00000
	(1.65 μm):	.00000	.00138	.00000	.00000
	(1.8 μm):	.00000	.00279	.00001	.00000
	(2.0 μm):	.00003	.08696	.00402	.00013
	(2.2 μm):	.00001	.14475	.01744	.00053

Abb. 88a: Veränderung der Reflexion von Fichtennadeln bei Trockenstreß



MITTLERE VARIANZ	Kurve Nr.			
	1	2	3	4
VIS (0.4-0.7µm):	.00011	.00001	.00001	.00002
NIR (0.7-1.13µm):	.00026	.00003	.00006	.00009
SWIR				
(1.3µm):	.00004	.00000	.00039	.00005
(1.65µm):	.00033	.00002	.00024	.00004
(1.8µm):	.00007	.00009	.00066	.00011
(2.0µm):	.02926	.00136	.00092	.00078
(2.2µm):	.0373	.00741	.00147	.0021

Abb.88b: Veränderung der Reflexion von Fichtenzweigen bei Trockenstreß

Im **nahen Infrarotbereich** fällt zunächst der Rückgang der Wasserabsorptionsbande sowie die Verschiebung der Reflexionsschulter (0,72 µm) zu längeren Wellenlängenbereichen hin auf. Zu Beginn der Austrocknung sinkt die Reflexion der Nadeln und Zweige im Bereich der Reflexionsschulter, steigt jedoch im übrigen nahen Infrarot im Vergleich zur Reflexion, die vor Versuchsbeginn gemessen wurde (für die Zweige schwach ausgeprägt), leicht an. Mit fortschreitender Austrocknung fällt die Reflexion im nahen Infrarotbereich immer deutlicher zurück, bzw. der im Vergleich zu den nicht gestreßten Nadeln und Zweigen zu beobachtende Reflexionsanstieg im längerwelligen nahen Infrarot wird zu größeren Wellenlängenbereichen hin verschoben. Der teilweise Rückgang der Reflexion im nahen Infrarot könnte mit der Schrumpfung der Zellen, wie sie bei Austrocknung an Luft auftritt, zusammenhängen.

Im **kurzwelligen Infrarot** kann zwar der Reflexionsanstieg beobachtet werden, im Gegensatz zu den Reflexionsuntersuchungen an ganzen Bäumchen ist jedoch für die Nadeln und Zweige kein Rückgang der Reflexion mehr zu beobachten.

Angesichts dieser Ergebnisse muß gefolgert werden, daß der oft bei Scanner- bzw. Feldspektoradiometerdaten im Gelände festgestellte Rückgang der Reflexion zwischen 0,7 µm und 1,8 µm bei Trockenstreß nicht nur durch nadel-spezifische Reflexionsveränderungen verursacht wird, sondern daß die Beeinflussung der Reflexion auch auf veränderte Blatt- bzw. Nadelstellung und unterschiedliche Schatten- bzw. Bodenverhältnisse zurückzuführen ist.

Die Betrachtung der **Quotienten** läßt zunächst mit zunehmender Austrocknung für alle Werte einen Anstieg erkennen (vgl. Tab. 29). Nur für die letzte Messung der völlig ausgetrockneten Nadeln ist ein leichter Wiederrückgang der Quotienten 660 nm/570 nm und 660 nm/820 nm zu registrieren. Dies ist wohl vorwiegend auf den deutlichen Anstieg der Reflexion im Bereich der Chlorophyllabsorption zurückzuführen.

Kurven Nr.	Gewichtsverlust		Quotient 660nm/570nm		Quotient 660nm/820nm		Quotient 1650nm/1100nm		Quotient 1800nm/1650nm	
			Nadeln	Zweige	Nadeln	Zweige	Nadeln	Zweige	Nadeln	Zweige
1 (7.10.)	0 %	0 %	.69	.72	.20	.17	.49	.42	1.18	1.04
2 (15.10.)	42 %	20 %	.78	.79	.24	.20	.49	.41	1.27	1.12
3 (24.10.)	45 %	41 %	.84	.86	.28	.24	.50	.43	1.28	1.19
4 (11.10.)	45 %	42 %	.83	.94	.27	.27	.59	.63	1.29	1.25

Tab.29: Quotienten zur Reflexion von Fichtenzweigen und -nadeln bei Trockenstreß

Für die **Minima und Maxima** ist im sichtbaren Wellenlängenbereich mit zunehmender Austrocknung eine Verschiebung des Reflexionspeaks von 560 nm auf 570 nm zu erkennen. Im nahen Infrarot wird ein Abflachen der Wasserabsorptionsdelle für die Nadeln sofort und für die Zweige etwa 15 Tag nach Versuchsbeginn bemerkt.

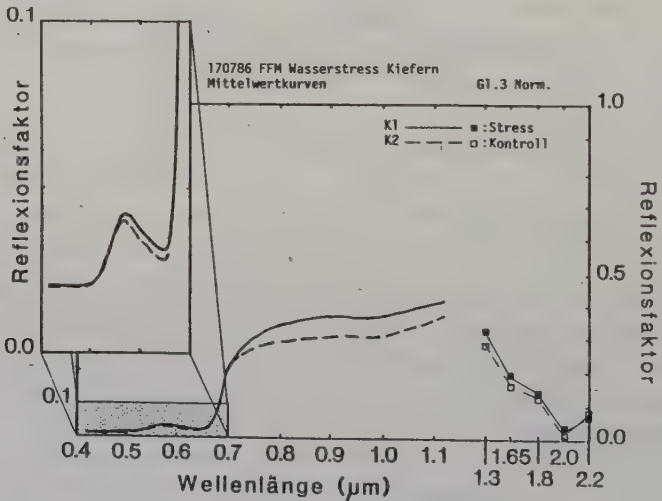
5.4.2 Geländemessungen zum Trockenstreß

Wie in Abschnitt 4.6.4 beschrieben, wurden zusammen mit amerikanischen Wissenschaftlern Trockenstreßexperimente im Gelände an Stroben und Fichten durchgeführt. Neben den von uns vorgenommenen Spektoradiometermessungen

erfolgten von den amerikanischen Kollegen Wasserpotentialmessungen und Flugzeugscannerbefliegungen (vgl. Abschn.4.6.4). Die Auswertung der **Flugzeugscannerdaten** (RIGGS et al. 1987) ergab dabei für die gestreßten Bäume im Vergleich zu den gesunden für die Strobenfläche etwas geringere und auf der Fichtenfläche leicht erhöhte Reflexionswerte.

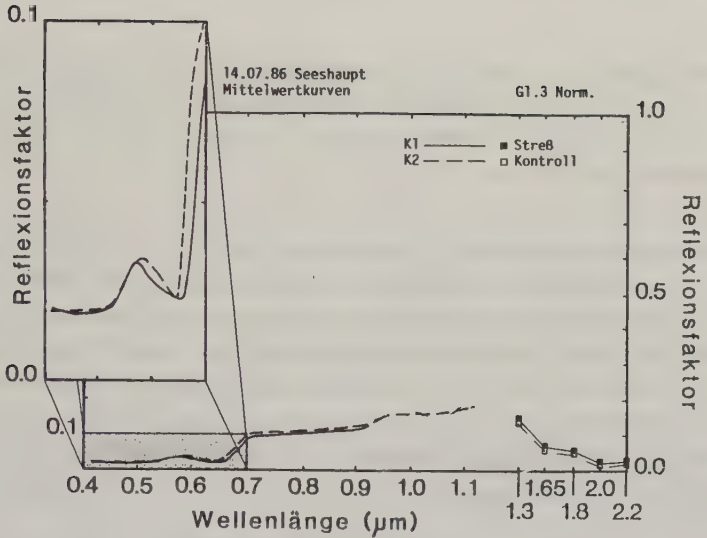
Die Messungen mit dem **Feldspektorradiometer** zeigen hingegen im Mittel (vgl. Abb. 89a) für die gestreßten Stroben, verglichen mit den gesunden, geringfügig erhöhte Reflexionswerte im **nahen und kurzwelligen Infrarot** bis $1,8 \mu\text{m}$. Im **Sichtbaren** und in den **Wellenlängenbereichen $2,0 \mu\text{m}$ und $2,2 \mu\text{m}$** kann kein Unterschied zwischen den Reflexionswerten der gestreßten und nicht gestreßten Bäume beobachtet werden. Die über den nichtgestreßten Stroben gemessene Reflexionskurve zeigt damit den bei Einfluß von Schatten bzw. dunklem Untergrund typischen Kurvenverlauf. Es kann deshalb davon ausgegangen werden, daß die für die nichtgestreßten Stroben leicht abgeschwächten Reflexionswerte im nahen Infrarot auf Unterschiede in der Schattenverteilung der Krone zurückzuführen sind.

Für die Fichte (vgl. Abb. 89b) konnten keine Reflexionsunterschiede festgestellt werden.



MITTLERE VARIANZ		Kurve Nr.	
		1	2
VIS	(0.4-0.7µm):	.00141	.00163
NIR	(0.7-1.13µm):	.07658	.01476
SWIR	(1.3µm):	.08489	.01734
	(1.65µm):	.03576	.00686
	(1.8µm):	.01377	.00556
	(2.0µm):	.00178	.00014
	(2.2µm):	.00898	.00143

Abb. 89a: Reflexion für Stroben (*Pinus strobus*) bei Trockenstreß (Gelände)



MITTLERE VARIANZ		Kurve Nr.	
		1	2
VIS	(0.4-0.7µm):	.00086	.0127
NIR	(0.7-1.13µm):	.00735	.01497
SWIR	(1.3µm):	.00404	.00211
	(1.65µm):	.00089	.00044
	(1.8µm):	.00109	.00019
	(2.0µm):	.00009	.00008
	(2.2µm):	.00026	.00012

Abb. 89b: Reflexion für Fichten bei Trockenstreß (Gelände)

Der Nachweis dafür, daß die im Gelände mit dem Feldspektorradiometer beobachteten Reflexionserhöhungen für die gestreßten Stoben mit großer Sicherheit nicht von einer Abnahme des Wassergehaltes in den Nadeln verursacht sind, wird auch durch die von RIGGS et al. (1987) parallel gemessenen Unterschiede im Wasserpotential gestützt (vgl. Tab. 30).

Uhrzeit	Wasserpotential Ψ	
	Kontrollbaum	Streßbaum
10.06-10.28 MEZ	Ψ -13.3 bar	Ψ -19.5 bar
11.05-12.08 MEZ	Ψ -15.3 bar	Ψ -18.0 bar
13.05-14.19 MEZ	Ψ -14.7 bar	Ψ -18.7 bar

Tab.30: Veränderung des Wasserpotentials der Stoben bei Trockenstreß, gemessen am 17.7.1986 (nach RIGGS et al. 1987)

Da im Labor trotz deutlicherer Unterschiede im osmotischen Potential (Wasserpotential) keine Reflexionsveränderung für die Streßbäumchen registriert werden konnten, ist davon auszugehen, daß auch im Gelände keine pflanzen-spezifischen Parameter die Reflexion beeinflussen.

Es kann auch angenommen werden, daß die von RIGGS et al. (1987) dokumentierten Reflexionsunterschiede zwischen gestreßten und nichtgestreßten Beständen ebenfalls auf den Einfluß des Untergrundes bzw. auf Veränderung in der Schattenverteilung der Krone zurückzuführen sind. Da es sich bei der Strobenversuchsfläche um einen dichtbestockten Jungbestand mit unbewachsenem Untergrund und bei der Fichtenversuchsfläche um einen locker bestockten Bestand mit dichter Bodenvegetation handelt, ist wohl ein Einfluß des Untergrundes am wahrscheinlichsten.

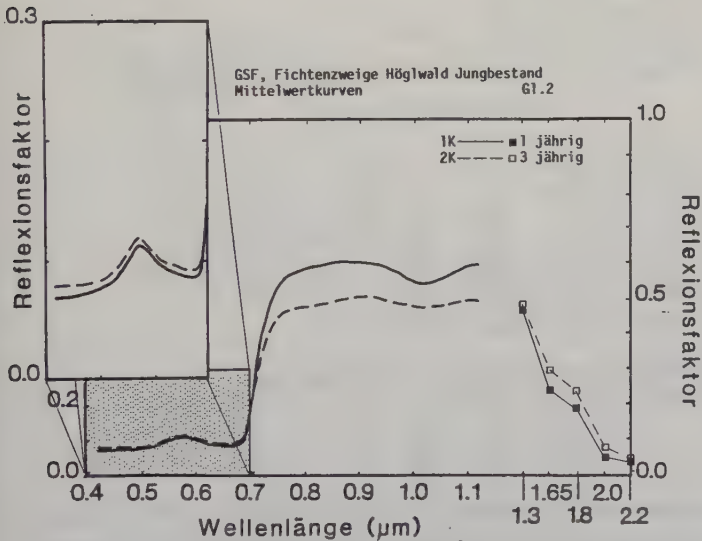
5.5. Reflexionsmessungen an unterschiedlich alten Bäumen bzw. Blattorganen

Anhand von Flugzeugscannerdaten, aber auch anhand von IRC-Luftbildern können unterschiedlich alte Bestände aufgrund ihrer spektralen Signatur im nahen Infrarot gut differenziert werden. Dabei wird gemeinhin davon ausgegangen, daß die Zellstruktur der Blattorgane einen ausschlaggebenden Einfluß auf diese Veränderung der spektralen Signatur im nahen Infrarot hat.

Um zu klären, ob die unterschiedliche spektrale Signatur, wie sie über jungen und alten Fichtenbeständen gemessen werden kann, tatsächlich durch blattspezifische Einflußparameter verursacht ist, wurden Feld- und Laborspektromettermessungen an Fichten der Altersklasse 0 - 20 Jahre und 80 - 100 Jahre sowie an deren Nadeln durchgeführt.

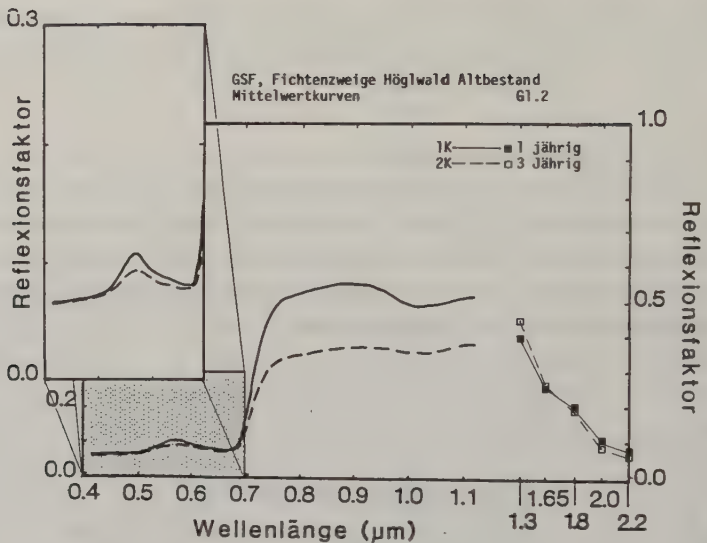
5.5.1 Labormessung zur Reflexion unterschiedlich alter Fichtennadeln und gleichaltriger Fichtennadeln von unterschiedlich alten Bäumen

Für die Reflexionsuntersuchungen an unterschiedlich alten Fichtennadeln sind - wie in Abschnitt 4.6.5 beschrieben - die 1jährigen und 3jährigen Nadeln von jungen (18 Jahre) und von alten Fichten (85 Jahre) gemessen worden. Dabei ist zunächst die Reflexion der 1jährigen derjenigen der 3jährigen Nadeln - in Abb. 90a für die jungen Fichten und in Abb. 90b für die alten Fichten - gegenübergestellt.



MITTLERE VARIANZ		Kurve Nr.	
		1	2
VIS	(0.4-0.7 μm):	.00018	.00004
NIR	(0.7-1.13 μm):	.00081	.00031
SWIR	(1.3 μm):	.00077	.00055
	(1.65 μm):	.00104	.00095
	(1.8 μm):	.00068	.00083
	(2.0 μm):	.00057	.00085
	(2.2 μm):	.00004	.00017

Abb. 90a: Reflexion von einjährigen und dreijährigen Nadeln von jungen Fichten



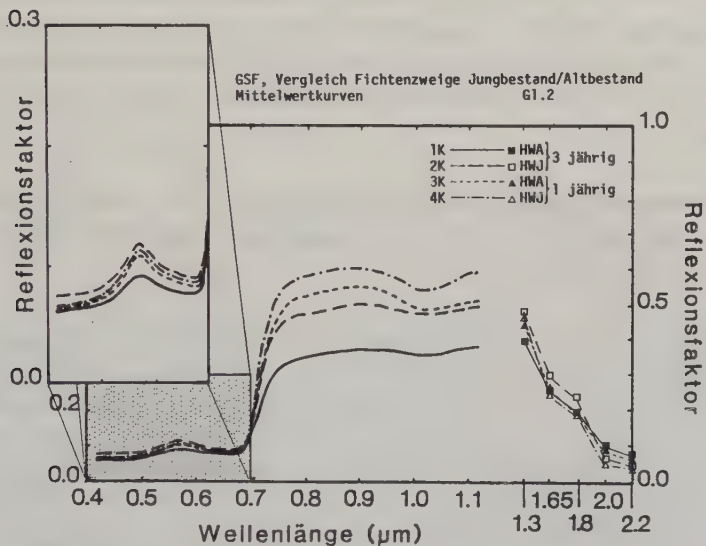
MITTLERE VARIANZ		Kurve Nr.	
		1	2
VIS	(0.4-0.7µm):	.00003	.00000
NIR	(0.7-1.13µm):	.00073	.00044
SWIR	(1.3µm):	.00042	.00014
	(1.65µm):	.00022	.00029
	(1.8µm):	.00008	.00029
	(2.0µm):	.00085	.00057
	(2.2µm):	.00064	.00181

Abb. 90b: Reflexion von einjährigen und dreijährigen Nadeln von alten Fichten

Die im Herbst entnommenen Nadelproben wiesen nur geringe Farbunterschiede auf, wie dies auch durch die im **sichtbaren Wellenlängenbereich** nur geringen Abweichungen in der Reflexion für die 1jährigen Nadeln im Vergleich zu den 3jährigen Nadeln deutlich wird. Im **nahen Infrarot** ist für die 1jährigen Nadeln im Vergleich zu den 3jährigen Nadeln erhöhte Reflexion zu beobachten. Dies entspricht den Befunden von DIRNHORN (1964) an Quitten, und von GATES (1970) an Eichenblättern (*Quercus robur*).

Im **kurzwelligen Infrarot** ist für die 3jährigen Nadeln der jungen Fichten im Vergleich zu den 1jährigen ein Reflexionsanstieg zu erkennen, für die Alt-fichten sind keine Reflexionsunterschiede zu registrieren.

Vergleicht man nun die 1jährigen bzw. die 3jährigen Nadeln der Altfichten mit den 1jährigen bzw. 3jährigen Nadeln der Jungfichten, so zeigen sich im **Sichtbaren** und im **kurzwelligen Infrarot** vernachlässigbare Reflexionsunterschiede (vgl. Abb. 91).



MITTLERE VARIANZ	Kurve Nr.			
	1	2	3	4
VIS (0.4-0.7 μm):	.00003	.00018	.00000	.00004
NIR (0.7-1.13 μm):	.00073	.00081	.00044	.00031
SWIR (1.3 μm):	.00042	.00077	.00014	.00055
(1.65 μm):	.00022	.00104	.00029	.00095
(1.8 μm):	.00008	.00068	.00029	.00083
(2.0 μm):	.00085	.00057	.00185	.00085
(2.2 μm):	.00064	.00004	.00181	.00017

Abb.91: Reflexionskurven einjähriger und dreijähriger Nadeln von Altfichten im Vergleich zu Jungfichten

Im **nahen Infrarot** ist hingegen die Reflexion von Nadeln der Altfichten im Vergleich zu Nadeln der Jungfichten desselben Jahrgangs geringer.

Diese beobachteten Reflexionsdifferenzen können wohl auf morphologische und physiologische Unterschiede zwischen den gleichalten Nadeln der Jungfichten bzw. Altlichten zurückgeführt werden, da aufgrund des abweichenden Mikroklimas im Altbestand und Jungbestand für die Nadeln eine unterschiedliche Entwicklungssituation gegeben ist (KOCH, W. 1987).

Eine Beeinflussung durch entscheidend voneinander abweichende Standortverhältnisse kann wohl ausgeschlossen werden, da es sich um benachbarte Bestände handelt, alle Nadeln aus der südexponierten Oberkrone entnommen worden sind und die jeweiligen Mischproben mehrere hundert Nadeln umfassen.

Die **Quotienten** bestätigen die Reflexionsunterschiede zwischen den Nadeln des Jungbestandes im Vergleich zu den gleichaltrigen Nadeln des Altbestandes (vgl. Tab. 31).

Kurve Nr.	Nadelalter	Quotient 660nm/570nm		Quotient 660nm/820nm		Quotient 1650nm/1100nm	
		HWJ*	HWA**	HWJ	HWA	HWJ	HWA
1	einjährig	.77	.79	.15	.19	.43	.62
2	dreijährig	.78	.86	.16	.22	.52	.70

Tab.31: Quotienten zur Reflexion von einjährigen und dreijährigen Fichtennadeln junger (18 Jahre) und alter (85 Jahre) Bäume

Eine Verschiebung der **Minima und Maxima** kann nicht beobachtet werden (vgl. Tab. A 16 im Anhang).

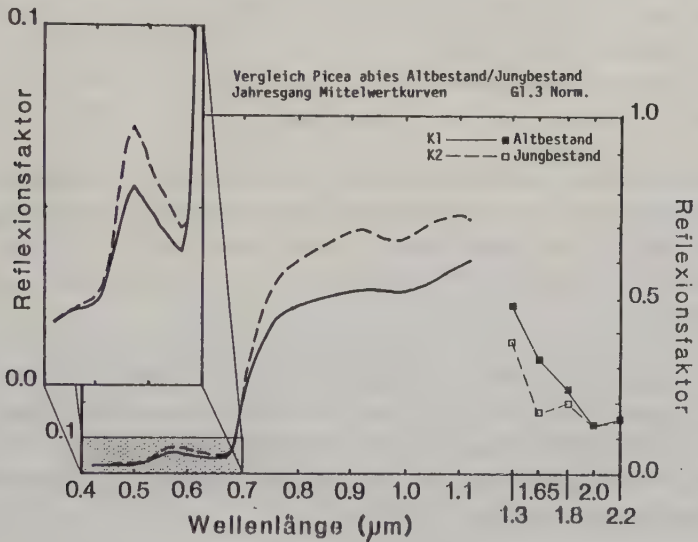
Aufgrund dieser Untersuchungsergebnisse muß wohl davon ausgegangen werden, daß Nadeln junger Fichten im Vergleich zu Nadeln alter Fichten desselben Jahrgangs im nahen Infrarot eine spezifisch andere Reflexion besitzen, was nach GATES (1970) und GAUSMANN (1970) auf Unterschiede im Zellaufbau zurückgeführt werden könnte.

* HWJ: Fichtenjungbestand im Höglwald

** HWA: Fichtenaltbestand im Höglwald

5.5.2 Geländemessungen zur Kronenreflexion unterschiedlich alter Bäume

Parallel zu den Laboruntersuchungen wurde - wie in Abschn. 4.6.5 beschrieben - auch die Kronenreflexion über jungen und alten Fichten gemessen. Wie Abb. 92 zeigt, entsprechen die erhaltenen Befunde im **Sichtbaren** und **nahen Infrarot** in etwa denen der Nadelmessungen, d.h. über den jungen Bäumen sind deutlich erhöhte Reflexionswerte im Vergleich zu den alten Bäumen gemessen worden (vgl. Abb. 92).



MITTLERE VARIANZ		Kurve Nr.	
		1	2
VIS	(0.4-0.7 μm):	.00137	.0025
NIR	(0.7-1.13 μm):	.08303	.31279
SWIR	(1.3 μm):	.11671	.09001
	(1.65 μm):	.07884	.0177
	(1.8 μm):	.03599	.03509
	(2.0 μm):	.02159	.02361
	(2.2 μm):	.02261	.01549

Abb.92: Reflexion junger und alter Fichten (Gelände)

Im **kurzwelligen Infrarot** zeigt sich für die Kanäle 1,3 μm , 1,65 μm und 1,8 μm erhöhte Reflexion für die Altfichten; bei 2,0 μm und 2,2 μm unterscheiden sich die Werte der Alt- und Jungfichten kaum mehr.

Die Mittelwertkurven für Jung- und Altfichten differenziert nach den Wachstumsperioden der Monate April, Juni und August ergaben ähnlich den Untersuchungen zur Veränderung der Reflexion im Jahresrhythmus erhöhte Reflexionswerte für Jungfichten im Vergleich zu Altfichten im sichtbaren Bereich und nahen Infrarot. Die Reflexionsunterschiede zwischen Jung- und Altfichten waren jedoch deutlichen Schwankungen unterworfen. Diese Variationen im Reflexionsunterschied können nur dadurch erklärt werden, daß sich in den Kronen unterschiedliche Schattenverteilungen ergeben haben (Boden ist in beiden Beständen nahezu unbewachsen) welche die gemessene Reflexion beeinflussen.

Nach diesen Ergebnissen bleibt festzuhalten, daß eine pflanzenspezifische Beeinflussung der Reflexion durch die Zellstruktur der Nadeln junger und alter Fichten vorzuliegen scheint. Dieser Effekt kann durch Kronen- bzw. Bestandesstrukturmerkmale (Nadelmasse, Bestockungsdichte usw.) überlagert werden.

Der **Quotient** 660 nm/570 nm im sichtbaren Wellenlängenbereich zeigt für den Jungbestand im Vergleich zum Altbestand einen geringeren Wert an. Dies könnte auf das etwas heller wirkende Grün der Jungfichten zurückzuführen sein, wobei der hier registrierte Unterschied im Quotienten vernachlässigbar ist (vgl. Tab. 32).

Kurve Nr.	Quotient 660nm/570nm	Quotient 660nm/820nm	Quotient 1650nm/1100nm
1 (Jungfichte)	.53	.10	.17
2 (Altfichte)	.56	.10	.29

Tab.32: Quotienten zur Reflexion von Jung- und Altfichten

Für den Quotienten 660 nm/820 nm liegt für die Kronenmessungen zwischen beiden Altersstufen im Gegensatz zu den Nadeln kein Unterschied in den

Werten vor. Dies deutet darauf hin, daß die sehr geringen nadelspezifischen Reflexionsunterschiede durch andere Einflußfaktoren - wie Nadelmasse usw. - überlagert werden können. Nach HORLER (1983) würde der annähernd gleiche Wert für den Quotienten $680 \text{ nm}/820 \text{ nm}$ auf einen ähnlich zu bewertenden Vitalitätszustand der Alt- und Jungfichten hinweisen. Im kurzwelligen Infrarot zeigt der Quotient $1650 \text{ nm}/1100 \text{ nm}$ für die Altfichten größere Werte an.

Die **Minima und Maxima** lassen im sichtbaren Wellenlängenbereich zwischen April und Juni eine Verschiebung des Reflexionspeaks im Grünen ($0,5 \mu\text{m}$ - $0,6 \mu\text{m}$) zu kürzeren Wellenlängenbereichen hin erkennen.

Bei der Betrachtung der Wasserabsorptionsdelle im nahen Infrarot - differenziert nach Wachstumsperioden - kann zunächst im April für die **Altfichten kein** und für die **Jungfichten ein zu kürzeren Wellenlängenbereichen hin** verschobenes Reflexionsminimum ($0,98 \mu\text{m}$ - $1,1 \mu\text{m}$) beobachtet werden.

Im Juni und August ist das Reflexionsminimum ($0,98 \mu\text{m}$ - $1,1 \mu\text{m}$) für beide Altersklassen deutlich bei 1000 nm ausgebildet (vgl. Tab. A 17 im Anhang).

6. DISKUSSION

Anhand der in Kap. 5 vorgestellten Ergebnisse soll diskutiert werden, inwieweit mit Hilfe der spektralen Rückstrahlungseigenschaften Schäden an Waldbäumen erfaßt werden können.

Als einer der wichtigsten Einflußfaktoren auf die Reflexion haben sich im Rahmen der Feldspektroradiometermessungen der **Schattenanteil im gemessenen Kronenausschnitt, der Baumuntergrund und die Spiegelungseffekte** erwiesen. Während Spiegelungseffekte für die Auswertung von Flugzeug-scanner- bzw. Satellitendaten aufgrund der größeren Meßfläche an Bedeutung verlieren, bleibt der Schattenanteil in der Krone bzw. im Bestand und der Untergrund ein erheblicher Einflußfaktor für digitale Scannerbilddaten.

Bedeutsam ist in diesem Zusammenhang, daß schon Unterschiede von 10 % des Schattenanteils im Meßausschnitt - wie in Abschnitt 5.1.1 dargelegt - bei den hier durchgeführten Messungen erhebliche Schwankungen im Reflexionsfaktor bzw. -grad zur Folge hatten. Dabei scheint für den **nahen Infrarotbereich** ($0,7 \mu\text{m}$ - $1,1 \mu\text{m}$) **der stärkste Einfluß** auf die Reflexion durch Schatten bzw. dunkle Flächen vorzuliegen.

Weshalb im nahen Infrarot, d.h. bei heller Reflexion der Vegetation eine stärkere Abschwächung derselben durch Schatten erfolgen kann, läßt sich anhand von Abb. 93 erläutern.

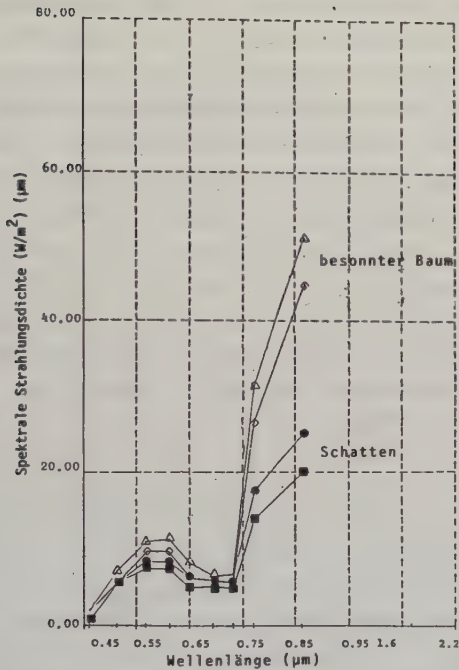


Abb.93: Reflexionskurven von beschatteten und beschienenen Kronenbereichen eines Fichtenbestandes; aufgenommen auf der Basis von Flugzeugscannerdaten (nach KOCH et al. 1985)

- Aus der Gegenüberstellung der Reflexionskurven von besonnentem Baum und Schatten wird deutlich, daß die Reflexion von dunklen, scheinbar schwarzen Kronenbereichen im sichtbaren Wellenlängenbereich in etwa das Reflexionsniveau der beschienenen Kronenteile erreicht. Im nahen Infrarot liegt jedoch die Reflexion des Schattens wesentlich unter der Reflexion der beleuchteten Kronenteile. Dies ist darauf zurückzuführen, daß die Reflexion von Schattenbereichen im Sichtbaren durch den erhöhten Einfluß des Streulichtes in etwa dem in diesem Wellenlängenbereich geringen Reflexionsniveau von beleuchteten Nadelbaumkronen entspricht. Es ist deshalb im Sichtbaren nur wenig Auswirkung auf die Baumreflexion durch Schatten bemerkbar.

- Im nahen Infrarot ist die Reflexion von grünen Pflanzen sehr hoch (vgl. GATES 1970), die Reflexionsdifferenz zu dem wenig reflektierenden Schatten ist daher entsprechend groß, auch deshalb weil der Anteil des Streulichtes deutlich abnimmt. Die sich aus Schattenanteilen und beleuchteten Kronenanteilen zusammensetzende Mischsignatur im Meßausschnitt erfährt deshalb im Vergleich zum Sichtbaren eine wirksamere Abschwächung.
- Der im nahen Infrarot auf die Reflexion von Pflanzen beobachtete stärkere abschwächende Einfluß durch dunkle Flächen entspricht dem von KORTÜM (1960) allgemein beschriebenen **größeren Einfluß** des dunklen Hintergrundes (hier Schatten) auf die Reflexion hell reflektierender Materialien (Baum im nahen Infrarot). Dieser Einfluß wird noch verstärkt bei geringem Streuvermögen des Meßobjektes, d.h. wenn Strahlung wenig hin und her reflektiert wird, wie dies bei einem hohen Anteil von "Schattenlöchern" bzw. bei geringer Nadelmasse der Fall ist (vgl. Tab. 33).

S.d.	1,5			5		20	
Rg	0	0,5	0,9	0	0,9	0	0,9
$R_{\infty} = 0,3$ dunkles Laub	R=0,297	R=0,302	R=0,307	R=0,299	R=0,3	R=0,3	R=0,3
$R_{\infty} = 0,5$ mittleres Laub	R=0,459	R=0,5	R=0,555	R=0,499	R=0,5	R=0,5	R=0,5
$R_{\infty} = 0,7$ helles Laub	R=0,556	R=0,643	R=0,782	R=0,660	R=0,707	R=0,699	R=0,7

S.d : Streuvermögen des Objektes

R_{∞} : angenommener Reflexionsfaktor bei unendlicher Objektdicke

Rg : Reflexionsfaktor des Untergrundes

R : tatsächlicher Reflexionsfaktor in Abhängigkeit der Parameter
S.d, R_{∞} und Rg

Tab.33: Veränderung des angenommenen Reflexionsfaktors (R_{∞}) bei unendlicher Schichtdicke in Abhängigkeit von der Reflexion des Untergrundes und dem Streuvermögen des Objektes (nach KORTÜM 1960 und ERNST 1987)

Eine ähnliche Wirkung wie der Schatten hat der **Untergrund** auf die über der Baumkrone gemessene Reflexion. Wie schon erwähnt und wie auch die Ergebnisse in Abschnitt 5.1.1 zeigen, führt heller Untergrund im Vergleich zu dunklem Untergrund zu einem **Reflexionsanstieg im sichtbaren Bereich und nahen Infrarot**. Im **kurzwelligen Infrarot** nach $1,8\text{ }\mu\text{m}$ **kehrt sich die Reflexion dann um**. Da der Einfluß des Untergrundes auf die Kronenreflexion mit **zunehmender Entnadelung bzw. Entlaubung steigt**, muß der Bestandesuntergrund bei der Klassifizierung von Waldbeständen nach ihrem Entnadelungsgrad als wichtige Größe mitberücksichtigt werden. Es zeigt sich auch, daß der Einfluß des Untergrundes wiederum in erster Linie auf den **nahen Infrarotbereich** wirkt. Dies ist auf dieselben Parameter zurückzuführen, wie sie für den Einfluß des Schattens beschrieben wurden.

Der bei den Untersuchungen (Kap. 5.1) beobachtete Anstieg der Reflexion über dunklen Flächen im **kurzwelligen Infrarot nach $1,8\text{ }\mu\text{m}$** im Vergleich zu hellen Flächen kann nach KORTUM (1960) und SABINS (1978) noch nicht auf thermische Einflüsse zurückgeführt werden. Es ist vielmehr anzunehmen, daß dunkle Böden in den Wellenlängenbereichen $2,0\text{ }\mu\text{m}$ und $2,2\text{ }\mu\text{m}$ heller reflektieren als Vegetation (vgl. SCHANDA 1976). Zusammen mit dem Rückgang der pflanzenspezifischen Absorption in den Wellenlängenbereichen $2,0\text{ }\mu\text{m}$ und $2,2\text{ }\mu\text{m}$ (hohe Absorption der Vegetation in diesen Wellenlängen kann es bei Nadelverlust so zu einem Anstieg der Reflexion bei durchscheinendem dunklen Untergrund kommen).

Auch wenn der Untergrund selbst keinen direkten Einfluß auf den Meßwert ausübt, muß mit einem direkten Einfluß durch ihn auf die über der Krone gemessene Reflexion gerechnet werden. Dies ist darauf zurückzuführen, daß die vom Waldboden in die Kronen hineinreflektierte hohe oder geringe Strahlung durch die Mehrfachreflexion im Kronenraum (u.a. Einfluß benachbarter Kronen) zum Teil zur Bestandesoberfläche reflektiert wird und damit die über der Krone bzw. dem Bestand gemessene Reflexionsintensität beeinflusst.

Daraus folgt, daß die pflanzenspezifisch unterschiedliche Reflexion von gesunden und kranken Bäumen durch den Untergrund und den Schatten überprägt bzw. verfälscht werden kann (vgl. Abschnitt 5.1).

Ein guter Indikator für den Einfluß von Schatten bzw. dunklem Untergrund auf die über der Krone gemessene Reflexion scheint das **Zusammenfallen der Werte in den Wellenlängenbereichen 2,0 μm bzw. 2,2 μm** zu sein. Liegen in diesen Wellenlängenbereichen für Bäume gleicher Spezies, die im nahen Infrarot im Vergleich zu anderen geringer reflektieren, keine Rückstrahlungsunterschiede mehr vor bzw. hat sich die Reflexion sogar erhöht, so ist ein Einfluß dunkler Flächen (Untergrund, Schatten) auf die Reflexion anzunehmen.

Die dargelegte Rückführung der vor allem im nahen Infrarot beobachteten Veränderungen der Reflexion auf den Einfluß des Untergrundes bzw. des Schattens könnte die oft unterschiedlichen Ergebnisse verschiedener Autoren für geschädigte Fichten- und Kiefernflächen (vgl. FÖRSTER 1986, HERRMAN et al. 1986, KOCH et al. 1985 und KRITIKOS et al. 1984) erklären.

Wie wichtig die Ausleuchtung des Baumes für die über der Krone gemessene Reflexion ist, zeigen auch die Untersuchungen zum **Jahresgang der Reflexion** bei Fichte. Anhand der Reflexionsmessungen im Labor und im Gelände wurde deutlich, **daß im Laufe der Vegetationsperiode sehr wohl eine pflanzenspezifische Beeinflussung der Reflexion vorliegt**. Die stärksten Reflexionsunterschiede werden dabei zwischen der Frühjahrsmessung vor Austrieb und der Sommermessung nach Austrieb beobachtet (vgl. Abschn. 5.2.1 bis 5.2.2).

Während der im **sichtbaren Wellenlängenbereich** vom Frühjahr zum Sommer registrierte pflanzenspezifische Reflexionsanstieg eindeutig durch die **Pigmentierung** bewirkt wird, konnte im Rahmen dieser Arbeit nicht geklärt werden, inwieweit der gleichzeitige Anstieg der Reflexion im **nahen Infrarot** auf die **Zunahme der Nadelmasse** oder/und auf **zellspezifische Einflußparameter** zurückzuführen ist. Der Rückgang der Reflexion im **kurzwelligen Infrarot**, wie er deutlich im Labor beobachtet werden konnte, ist möglicherweise auf die verstärkte Absorption durch die Wasseraufnahme während der Blattentwicklung zurückzuführen. Im Labor und Gelände konnte nach **Abschluß des Nadelwachstums** aufgrund des Nachdunkelns der Nadelfarbe ein **leichter Reflexionsrückgang im sichtbaren Wellenlängenbereich** beobachtet werden. Im Labor war ein Rückgang der Reflexion im **nahen und kurzwelligen Infrarot** zu erkennen, während im Gelände **praktisch keine Reflexionsveränderungen** mehr vorlagen.

Will man diese **baumspezifischen Einflüsse auf die Reflexion** allerdings im Gelände erfassen, so ist auf den **Einstrahlungswinkel der Sonne, d.h. auf die Beleuchtungsverhältnisse besonders zu achten**. Wie schon die Untersuchungen zum Tagesgang der Reflexion von Fichte in Abhängigkeit vom Einstrahlungswinkel gezeigt haben, ist bei Fichte mit kleiner werdendem Sonnenzenitwinkel ein deutlicher Reflexionsrückgang festgestellt worden (vgl. Abschn. 4.2.1). Dies dürfte auf den zunehmenden Anteil von Strahlung, der bei steiler werdendem Einfallswinkel der Sonne ins Bestandesinnere eindringt und dort absorbiert wird, zurückzuführen sein. Gestützt wird diese Annahme durch Untersuchungen von DIRMHIRN (1964), die mit steiler werdendem Einfallswinkel der Sonne eine Zunahme der Strahlung im Bestandesinneren nachweisen konnte.

Natürlich schwankt der **bei abnehmendem Sonnenzenitwinkel beobachtete Rückgang der Reflexionsintensität** in Abhängigkeit von der Kronenform. Je spitzkroniger die Bäume, desto deutlicher ist die hier beschriebene Abhängigkeit einzuschätzen. Dabei können – wie anhand der Ergebnisse zum Jahresgang der Reflexion von Fichte bei gleicher Tageszeit aber unterschiedlichem Sonnenzenitwinkel nachgewiesen werden konnte (vgl. Abschn. 5.2) – bei Feldmessungen schon Winkelabweichungen kleiner 10° einen entscheidenden Einfluß auf die über der Krone gemessenen Reflexionsintensität haben und **pflanzen-spezifische Reflexionsveränderungen** überlagern.

Wesentlich ausgeprägter als für die Fichte waren die an Buche registrierten pflanzenspezifischen Reflexionsunterschiede kurz nach Austrieb, im Vergleich zu den fast völlig ausdifferenzierten Blättern. Hier ist – im Gegensatz zur Fichte – nach Austrieb der Blätter im weiteren Verlauf der Vegetationsperiode eine **deutliche Abnahme der Reflexion im gesamten Wellenlängenbereich** zu beobachten. Dies entspricht dem von GATES (1970) dokumentierten Reflexionsverhalten von verschiedenen alten Eichenblättern.

Die von der Fichte abweichende Veränderung der Reflexionsintensität im Ablauf der Vegetationsperiode ist damit zu erklären, daß bei Buche erst nach Austrieb der Blätter mit den Messungen begonnen wurde; dies bedeutet, daß die ersten Messungen bei Buche in etwa den Frühsommermessungen bei Fichte entsprechen.

Die Tatsache, daß darüberhinaus die Reflexionsveränderungen im Verlauf der

Vegetationsperiode bei der Buche wesentlich deutlicher ausfallen, beruht darauf, daß bei Laubbäumen nur neue Blätter Einfluß auf die Reflexion nehmen können, während für fast alle Coniferen eine Mischsignatur aus einem hohen Anteil von Altnadeln mit einem geringen Anteil Jungnadeln gemessen wird.

Anhand dieser Ergebnisse wird deutlich, daß bei **multitemporalen vergleichenden Auswertungen die pflanzenspezifischen Veränderungen im Verlauf der Vegetationsperiode beachtet werden müssen**, insbesondere dann, wenn eine Schadensbeurteilung vorgenommen werden soll. Außerdem ist der **Einstrahlungswinkel der Sonne als wichtiger Einflußfaktor auf die Baumreflexion einzubeziehen**, wobei schon Winkelveränderungen um 10° bei den hier senkrecht nach unten durchgeführten Feldspektorradiometermessungen zu einer Verfälschung der nadelspezifischen Reflexion geführt haben. So konnten z.B. für gleiche Entnadelungsgrade bei Kiefer in Abhängigkeit vom Einstrahlungswinkel der Sonne am selben Tag völlig unterschiedliche Reflexionsintensitäten gemessen werden (vgl. Abb.94).

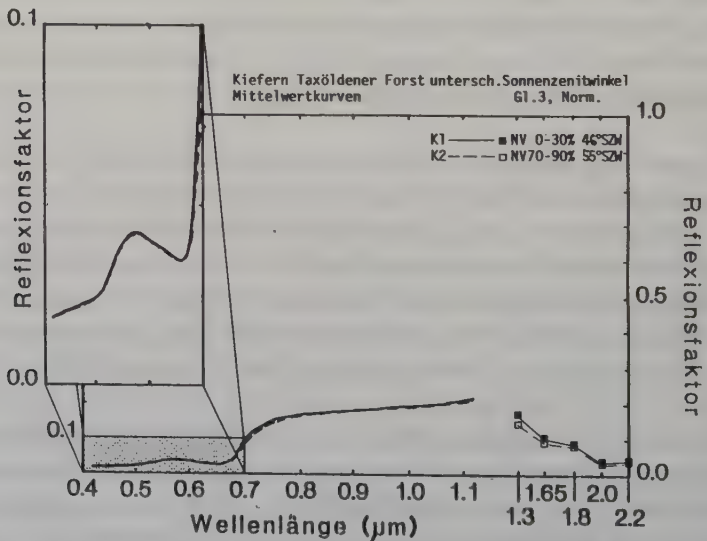


Abb. 94a: Reflexion von Kiefern mit unterschiedlichem Nadelverlust (NV) bei abweichendem Sonnenzenitwinkel

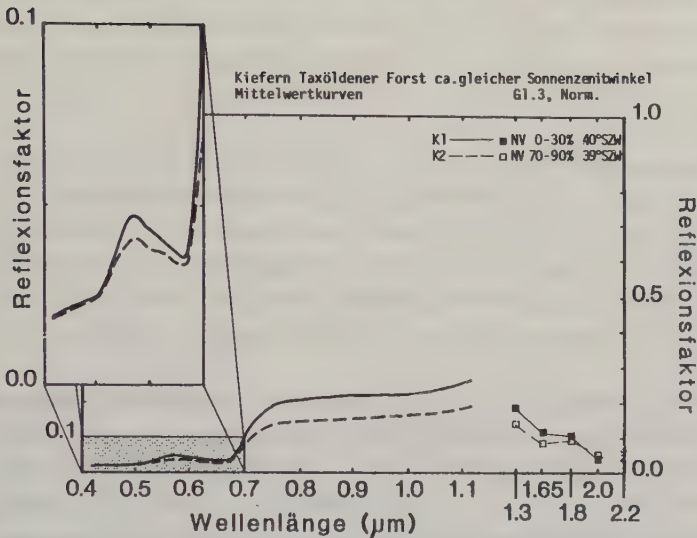


Abb. 94b: Reflexion von Kiefern mit unterschiedlichem Nadelverlust (NV) bei gleichem Sonnenzenitwinkel

Die **Vergilbung** war der **einzigste pflanzenspezifische Parameter**, der anhand der Reflexion im sichtbaren Wellenlängenbereich auch bei variierenden Geländebedingungen (z.B. Einstrahlung, Untergrund, Bestandesstruktur usw.) stets deutlich erfaßt werden konnte (vgl. Abschnitt 5.3).

Dabei verdeutlichten die Untersuchungen im Labor, daß unterschiedliche Vergilbungsgrade zu einer graduierlichen Veränderung der Reflexion im Sichtbaren führen. Eine **Auswirkung auf den nahen bzw. kurzwelligen Infrarotbereich** ist allerdings erst bei den nach der Farbskala (MUNSELL COLOR CHARTS FOR PLANT TISSUES) als **gelb bis braun eingestuftten Blattorganen** zu erkennen gewesen. Hierbei war für Laubblätter im nahen Infrarotbereich bis etwa $1,0 \mu\text{m}$, für Fichten- und Kiefernadeln für den gesamten **nahen Infrarotbereich** (einschl. $1,1 \mu\text{m}$) ein **Reflexionsrückgang** - bei gleichzeitigem Anstieg der Reflexion im kurzwelligen Infrarotbereich - zu registrieren. Es kann somit angenommen werden, daß die mit der Vergilbung einhergehenden Veränderungen in der Zellstruktur - z.B. die Lumenverringerng und die Kondensierung des Cytoplasmas, wie dies SCHMITT et al.

(1986) beschrieben haben - ursächlich sind für die nadelspezifische Reflexion im nahen Infrarot. Der Reflexionsanstieg im kurzwelligen Infrarotbereich könnte durch die mit der Vergilbung gewöhnlich einhergehende Entwässerung der Blattorgane bewirkt worden sein.

Wie leicht die mit der Vergilbung einhergehende Reflexionsveränderung im **nahen und kurzwelligen Infrarot durch äußere Einflußfaktoren** wie Untergrund, Schattenverteilung, Einstrahlungsbedingungen usw. überlagert werden kann, wird anhand der bei Geländemessungen beobachteten starken Variationen im Reflexionsunterschied zwischen den untersuchten vergilbten und grünen Fichtenbeständen deutlich (vgl. Abschnitt 5.3).

Die Reflexionsveränderungen, die durch **künstlich erzeugten Trockenstreß** bewirkt wurden, müssen zwar nicht völlig identisch sein mit den bei **natürlichem Trockenstreß** auftretenden Reflexionsveränderungen; ein ähnliches Reflexionsverhalten ist aber wahrscheinlich, da vorwiegend der Wassergehalt Einfluß auf die Reflexion hat. Die in Abschnitt 5.4 dargelegten Untersuchungsergebnisse zeigen einen **Einfluß der nadelspezifischen Reflexion** erst bei mehr als 40 % Verlust an Frischgewicht der Nadeln (für Nadeln konnten unter Zimmertemperaturbedingungen insgesamt 45 % Verlust an Frischgewicht gemessen werden) und belegen damit, daß mit einer Auswirkung auf die Reflexion nur bei deutlichem Wasserverlust zu rechnen ist.

Der nadelspezifische Einfluß auf die Reflexion bei Wasserverlust bewirkte zunächst einen **Anstieg im kurzwelligen Infrarot. Mit fortschreitender Austrocknung** war dann für die kürzeren Wellenlängenbereiche im nahen Infrarot, beginnend bei $0,7\text{ }\mu\text{m}$, ein **Rückgang** der Reflexion bei gleichzeitigem Anstieg im längerwelligen nahen Infrarotbereich zu beobachten (vgl. Abschnitt 5.4). Im **sichtbaren Wellenlängenbereich** konnte bei fortgeschrittener Austrocknung der Nadeln ein **Absinken** des Reflexionsmaximums im **Grünen**, ($0,5\text{ }\mu\text{m}$ - $0,6\text{ }\mu\text{m}$) bei gleichzeitigem **Rückgang der Chlorophyllabsorption** ($0,6\text{ }\mu\text{m}$ - $0,7\text{ }\mu\text{m}$) registriert werden.

Diese vom Blattorgan selbst ausgehenden Reflexionsveränderungen können in Abhängigkeit von der **Kronenstruktur** und vom **Baumuntergrund** erheblich **verfälscht** werden (vgl. Abschn. 5.4.1.1 und 5.4.2). Da für Trockenstreßbäumchen über dunklem Untergrund mit zunehmender Austrocknung im Vergleich

zu den Nadeln und Zweigen abweichende Reflexionsveränderungen festgestellt werden konnten (vgl. Abschnitt 5.4.1), ist wohl davon auszugehen, daß die im Gelände beobachtete Reflexion bei Trockenstreß erheblich von Veränderungen in der Kronenstruktur und vom Baumuntergrund mit beeinflußt ist. Damit werden auch die in der Literatur oft widersprüchlichen Ergebnisse für Reflexionsmessungen über Bäumen bzw. Pflanzenbeständen mit Trockenstreß verständlich (vgl. MYERS 1970, RIGGS et al. 1987, TUCKER 1980). Je nach Art des Untergrundes kann durch die bei Trockenstreß zunehmend durchlässigere Krone (Veränderung der Blatt- bzw. Zweigstellung durch abnehmende Turgeszenz) ein Reflexionsrückgang bzw. -anstieg in den Wellenlängenbereichen $0,7 \mu\text{m}$ - $1,8 \mu\text{m}$ registriert werden.

Wie bei den Untersuchungen zum Trockenstreß zeigte sich auch bei den Messungen zum **Baum- bzw. Blattalter** nur ein geringer nadelspezifischer, d.h. ein durch Pigmentierung, Zellstruktur oder Wassergehalt verursachter Einfluß auf die Reflexion. Die Gegenüberstellung der Reflexion gleichaltriger Nadeln von jungen und alten Bäumen ergab im **sichtbaren Bereich** und **kurzwelligen Infrarot kaum Reflexionsunterschiede** bzw. im **nahen Infrarot** eine leicht **abgeschwächte Reflexion** für die Nadeln alter Bäume im Vergleich zu den Nadeln junger Bäume. Bei den Geländemessungen waren dagegen im sichtbaren Bereich und nahen Infrarotbereich die Reflexionswerte für junge Bäume deutlich erhöht, während in den Kanälen $2,0 \mu\text{m}$ und $2,2 \mu\text{m}$ keine Reflexionsunterschiede mehr für Jung- und Altfichten nachgewiesen werden konnten. Dieses von den Ergebnissen aus den Laboruntersuchungen stark abweichende Reflexionsverhalten weist wiederum auf den Einfluß der **nicht blatt- bzw. nadelspezifischen** Parameter hin. Während im Sichtbaren die unterschiedliche Pigmentierung der jungen Bäume im Vergleich zu den alten die Reflexion im wesentlichen bestimmt haben könnte, dürften im nahen und kurzwelligen Infrarot vor allem die Kronenstruktur und die Nadeldichte als Haupteinflußfaktoren auf die Reflexionsintensität wirken.

Zur Erfassung der **baumspezifischen** Reflexionsveränderung haben sich die im Rahmen dieser Arbeit verwendeten Quotienten bzw. die Analyse der Minima und Maxima als nützlich erwiesen. Obwohl nicht unabhängig von den äußeren Einflußfaktoren, wie Schatten und Untergrund, scheint doch vor allem der **Quotient $660 \text{ nm}/820 \text{ nm}$** und die **Lage des Reflexionsminimums zwischen $0,98 \mu\text{m}$ und $1,0 \mu\text{m}$** als **Vitalitätsindikator** geeignet sein.

Als wünschenswert wäre es anzusehen, wenn die hier präsentierten Ergebnisse auch durch Langzeitversuche statistisch abgesichert werden könnten.

Abschließend bleibt zu unterstreichen, daß offensichtlich der **blatt- bzw. nadelspezifische Einfluß auf die über der Baumkrone gemessene Reflexion im Vergleich zu äußeren Parametern - wie Kronenstruktur, Untergrund und Beleuchtungsverhältnisse - oft gering ist.**

Dies ist für die Schadenserfassung von fundamentaler Bedeutung und erfordert, daß für die Schadensklassifizierung Kriterien erarbeitet werden müssen, die diese Einflußfaktoren soweit wie möglich berücksichtigen.

7. Zusammenfassung

Die Untersuchungen zur Reflexion von Waldbäumen mit unterschiedlichen Schadenssymptomen erfolgten vorwiegend an Fichte, aber auch an Kiefer und Buche. Messungen wurden mit dem Spektroradiometer im Wellenlängenbereich $0,4 \mu\text{m}$ bis $2,2 \mu\text{m}$ sowohl im Labor als auch im Gelände vorgenommen. Dabei wurde der Einfluß folgender Parameter auf die Reflexion untersucht:

- Nadel- bzw. Blattverlust
- Jahresrhythmus der Waldbäume
- Vergilbung
- Trockenstreß
- Nadel- bzw. Baumalter

Neben den vorab durchgeführten ausführlichen Tests zur Erprobung der Meßeigenschaften des Spektroradiometers wurden im Rahmen von Voruntersuchungen zunächst die Parameter für die Meßsystemanordnung erarbeitet.

Die Untersuchungen im Labor erfolgten in einer speziell für dieses Vorhaben angefertigten Photometerkugel. Diese ist ein in sich geschlossenes System und ermöglicht damit Messungen unter Standardbedingungen. Für die Einbringung der Meßobjekte in die Kugel konnte diese in zwei Hälften auseinandergeklappt werden. Die Voruntersuchungen zeigten, daß ein direktes Anmessen der Objekte bei indirekter Beleuchtung die geeignetste Meßmethode ist. Durch die spezielle Art der Anbringung des Meßkopfes war gewährleistet, daß die Objekte in der Photometerkugel, in gleicher Weise wie im Gelände, nämlich senkrecht von oben angemessen werden konnten. Im Gelände wurden die Messungen von einer ausfahrbaren Leiter 8 - 10 m über dem Bestand senkrecht nach unten oder mit einem Meßzenitwinkel von 45° durchgeführt. Die Abspeicherung der im Gelände erhobenen Meßwerte erfolgte digital auf kleinen transportablen Rechnern.

Hauptergebnis der Voruntersuchungen war, daß neben der Beachtung der allgemeinen Wetterbedingungen vor allem der Einstrahlungszenitwinkel als bedeutender Einflußfaktor auf die über den Bäumen gemessene Reflexionsintensität zu berücksichtigen ist. Für den abnehmenden Einstrahlungszenitwinkel der Sonne konnte ein Rückgang der Reflexionsintensität festgestellt werden. Da alle Schrägmessungen in Mitlichtrichtung, d.h. in Nordrichtung durchge-

führt wurden, war der Beobachtungssazimut für die hier durchgeführten Untersuchungen ohne Bedeutung.

Die Voruntersuchungen zeigten auch, daß die Erfassung der tatsächlichen Bestrahlungsstärke auf der Kronenoberfläche über eine in der vorgeschriebenen Horizontlage befindlichen Referenzfläche bzw. über die aus dem oberen Halbraum einfallende Globalstrahlung schwierig ist. Dies ist darauf zurückzuführen, daß die Kronenoberflächen der Waldbäume in ihrer Exposition erheblich von der Horizontalen abweichen. Es wurde deshalb im Zuge der Datenverarbeitung zur Korrektur dieses Fehlers im Wellenlängenbereich $0,43 \mu\text{m}$ eine Normierung der Reflexionswerte durchgeführt. Die Normierung erfolgte im Wellenlängenbereich $0,43 \mu\text{m}$, da Bäume der gleichen Spezies in diesem Bereich kaum Reflexionsunterschiede zeigen. Bei der rechnergestützten Auswertung der Daten wurden neben der Darstellung der Spektralkurven jeweils die Quotienten $660 \text{ nm}/570 \text{ nm}$, $660 \text{ nm}/820 \text{ nm}$ und $1650 \text{ nm}/1100 \text{ nm}$ ($1800 \text{ nm}/1650 \text{ nm}$) berechnet, sowie eine Analyse der Minima und Maxima in den Wellenlängenbereichen 550 nm – 660 nm , sowie 920 nm – 1000 nm vorgenommen. Die Berechnung der Quotienten und die Analyse der Minima und Maxima erfolgte um die pflanzen-spezifischen Reflexionsveränderungen zu verdeutlichen.

Die **Auswertung** der Reflexionsmessungen ergab für die Untersuchungen zum **Nadel- bzw. Blattverlust**, daß der stärkste Einfluß auf die Reflexion nicht durch die geringere Nadelmasse selbst verursacht wird, sondern durch die bei Nadelverlust entstehenden "Schattenlöcher" bzw. durch den mit dem Nadelverlust zunehmend wirksamer werdenden Untergrund. Es konnte nachgewiesen werden, daß selbst bei gleichem Entnadelungsgrad die Reflexion in Abhängigkeit vom Untergrund und von dem im Meßausschnitt befindlichen Schattenanteil erheblich variieren kann. Hierbei ist das Ausmaß der Beeinflussung der Reflexion durch "Schattenlöcher" bzw. des Untergrundes vom Streuvermögen und der Helligkeit des Baumes abhängig. Die Beeinflussung der Baumreflexion durch dunkle Flächen bzw. Schatten konnte sowohl im Labor als auch im Gelände nachvollzogen werden.

Für die Untersuchungen zur Veränderung der pflanzen-spezifischen Reflexion im **Jahresrhythmus** konnte für die Fichte im sichtbaren Bereich und im nahen Infrarot ein deutlicher Anstieg der Reflexion mit dem Nadelaustrieb beobachtet werden, während im kurzwelligen Infrarot kaum Veränderungen vorlagen. Nach Ausdifferenzierung der Nadeln ergaben sich keine Veränderungen mehr.

Die Buche zeigte die höchsten Reflexionswerte im Frühjahr kurz nach Austrieb; zum Sommer hin sinken die Werte deutlich ab. Über diese spezifischen Reflexionsverhältnisse hinaus haben die Untersuchungen zu dem Ergebnis geführt, daß die pflanzenspezifischen Veränderungen in der Reflexion von Waldbäumen während der Vegetationsperiode durch den Einstrahlungswinkel verfälscht bzw. überlagert werden können.

Die **Vergilbung** war der einzige pflanzenspezifische Parameter, der auch bei variierenden äußeren Einflußfaktoren im sichtbaren Wellenlängenbereich als typische Reflexionscharakteristik stets zu erkennen war, und zwar führten im sichtbaren Wellenlängenbereich leichte Vergilbungen zu einem Reflexionsanstieg, während bei starker Vergilbung, d.h. bei gelbbraunen Blattorganen ein Rückgang des Reflexionspeaks ($0,5\ \mu\text{m}$ - $0,6\ \mu\text{m}$) registriert wurde. Die Reflexion im Bereich der Chlorophyllabsorptionsbande ($0,6\ \mu\text{m}$ - $0,7\ \mu\text{m}$) stieg mit zunehmender Vergilbung stetig an. Im nahen Infrarot war für die Messungen im Labor bei **starker** Vergilbung bzw. Verbraunung eine Abschwächung der Reflexion zu erkennen, die mit einem Reflexionsanstieg im kurzwelligen Infrarot einherging. Diese Veränderungen der Reflexion im nahen und kurzwelligen Infrarot konnten allerdings im Gelände nicht mit derselben Deutlichkeit nachvollzogen werden.

Die Untersuchungen zum Einfluß des **Wassergehaltes** auf die Reflexion ließen erst bei fortgeschrittener Austrocknung der Blatt- bzw. Nadelorgane Auswirkungen auf die Reflexion erkennen. Dabei zeigte sich zunächst ein Anstieg der Reflexion im kurzwelligen Infrarot ($1,3\ \mu\text{m}$ - $2,2\ \mu\text{m}$), mit zunehmendem Trockenstreß konnte dann aber auch ein Rückgang der Reflexion in den kürzeren Wellenlängenbereichen des nahen Infrarots ($0,7\ \mu\text{m}$ und $0,9\ \mu\text{m}$) beobachtet werden. Diese im Labor erzielten Ergebnisse waren im Gelände nach 14tägigem Trockenstreß (Abschneiden des Stammes) an jungen Stoben und an Alt-fichten noch nicht zu bestätigen.

Die Untersuchungen zum **Nadel- bzw. Blattalter** zeigten im Labor für jüngere Nadeln leicht erhöhte Reflexionswerte im nahen Infrarot, während im sichtbaren Bereich und kurzwelligen Infrarotbereich kaum Reflexionsunterschiede zu beobachten waren. Für die Nadeln von einem jungen Baum konnten im Vergleich zu den Nadeln desselben Jahrgangs von einem alten Baum ebenfalls erhöhte Reflexionswerte im nahen Infrarot, bei kaum voneinander abweichenden

Werten im sichtbaren Bereich und kurzwelligen Infrarot festgestellt werden. Im Gelände wurde sowohl im Sichtbaren als auch im nahen Infrarot für Messungen über Altfichten - verglichen mit denen über Jungfichten - eine geringere Reflexion vorgefunden. Im kurzwelligen Infrarot kehrte sich dieses Verhalten um. Diese Unterschiede zwischen Labor- und Geländemessungen machten wieder einmal die Überlagerung der pflanzenspezifischen Einflüsse auf die Reflexionsintensität durch Kronen- bzw. Bestandesstrukturmerkmale deutlich.

Abschließend kann festgestellt werden, daß die im Labor sehr gut erfaßbaren pflanzenspezifischen Einflußfaktoren auf die Reflexion im Gelände oft nicht registriert werden konnten, weil sie dort durch äußere Parameter wie Bestands- bzw. Kronenstruktur, Untergrund und Beleuchtungsverhältnisse überlagert wurden. Weniger beeinflusst von äußeren Einflußfaktoren, wie Schatten und Untergrund, zeigten sich die Quotienten sowie die Lage der Reflexionsminima und -maxima.

LITERATURVERZEICHNIS

- AMMER, U. (1983): Welche Fragestellungen und Probleme ergeben sich aus den bisherigen Untersuchungen mit IR-Luftbildern und Multispektral-scanneraufnahmen für die Waldschadensinventur? In: Bericht zum Statusseminar "Waldsterben", Oberpfaffenhofen.
- BAUMGARTNER, A., MAYER, H., NOACK, E.-M. (1985): Untersuchung des Einflusses von Bebauung und Bewuchs auf das Klima und die lufthygienischen Verhältnisse in bayerischen Großstädten.
Abschlußbericht zum Teilprogramm "Thermalkartierungen". Forschungsvorhaben Nr. 8272-VI/ 4b-7106 im Auftrag des Bayerischen Staatsministeriums für Landesentwicklung und Umweltfragen.
- BAYER. LANDESAMT FÜR UMWELTSCHUTZ (1981): Lufthygienische Lage in München.
Interner Bericht.
- BOSSHARD, W. (1986): Kronenbilder mit Nadel- und Blattverlustprozenten.
Eidgenössische Anstalt für das forstliche Versuchswesen,
Birmensdorf, CH.
- BRAUN, H.J., FINK, S. (1986): Histologische, histochemische und enzymologische Untersuchungen an Geweben erkrankter Bäume ("Waldsterben") in vivo und in vitro. Interner Bericht des Instituts für Forstbotanik und Holzbiologie der Albert-Ludwig-Universität Freiburg.
- CLAUSEN, D. (1986): Bau, Entwicklung und Eichung eines Spektroradiometers für ökologische Zwecke. Diplomarbeit am Institut für Biophysik der Universität Hannover.
- DIRMHIRN, I. (1964): Das Strahlungsfeld im Lebensraum. Akademische Verlagsgesellschaft, Frankfurt am Main.
- DOBNER, M. (1986): Tabellen zum osmotischen Potential von Fichtennadeln der für Reflexionsmessungen ausgewählten Versuchsbäume, Lehrstuhl für Forstbotanik der Universität München.
- ELLER, B.M. (1979): Die strahlungsökologische Bedeutung von Epidermisauf-lagen. Flora 168, S. 146-192.

- ELLER, B.L., GLÄTTLI, L., FLACH, B. (1981): Optical properties and pigments of sun- and shade leaves of the beech (*Fagus Sylvatica* L.) and the cooper beech (*Fagus Sylvatica* cv. *Atropunica*). *Flora* (1981) 171, pp. 170-185.
- ELLING, W. und KNOPPIK, D. (1986): Spektrales Reflexionsverhalten von Fichtenzweigen mit Chlorosen und Nekrosen der Nadeln. *Allgemeine Forstzeitschrift* 18/1986, S. 431-432.
- ENDERS, G. (1985): MINELF. Computerprogramm zur Sonnenstandsveränderung. Lehrstuhl für Bioklimatologie und angewandte Meteorologie der Universität München.
- ERNST, D. (1987): Interner Bericht zu den Meßeigenschaften des Feldspektroradiometers. Lehrstuhl für Biophysik der Universität Hannover.
- ESA Land applications Working Group (1987): Remote Sensing for Advanced Land Applications. ESA Sp. 1075, May 1987.
- FRAYSSE, G. (1984): Perspectives of Remote Sensing at the end of the decade. Proc.: Integrative Approaches in Remote Sensing, Guildford UK, 8. - 11. April 1984. ESA Sp. 214, Aug. 1984.
- GALLI DI PARATESI, S.R. (1986): The role and perspective of Remote Sensing for disaster management in the European Community. ESA/EARSeL Symposium on Europe from Space, Lyngby, DK, 25. - 28. Juni 1986. ESA Sp. 258, Dec. 1986.
- GATES, D.M. (1970): Physical and physiological properties of plants. In: Remote Sensing with special references to agricultures and forestry. National academy of sciences, Washinton D.C., 1970.
- GAUSMAN, H.W., ALLEN, W.A., CARDENAS, R., RICHARDSON, A.J. (1979): Relation of Light Reflectance to Histological and Physical Evaluations of Cotton Leaf Maturity. *APPLIED OPTICS*, Vol. 9, No. 3, März 1970.
- GAUSMAN, H.W. (1984): Evaluation of Factors Causing Reflectance Differences between Sun and Shade Leaves. *Remote Sensing of Environment* 15, S. 177-181, 1984.

- HERRMANN, K., ROCK, B.N., AMMER, U., PALEY, H.N. (1987): Preliminary evaluation of Airborne Imaging Spectrometer Data and Airborne Thematic Mapper Data on Forest Decline in the FRG. Remote Sensing of Environment, im Druck.
- HILDEBRANDT, G. (1983): Considerations of a Permanent Inventoring and Monitoring System of European Forests. Proc. of a EARSeL/ESA Symposium on Remote Sensing Applications for Environmental Studies, Brüssel, 26 - 29 April 1983.
- HILDEBRANDT, G., KADRO, A. (1984): Aspects of Countrywide Inventory and Monitoring of Actual Forest Damages in Germany. Bildmessung und Luftbildwesen 52, S. 201-216.
- HOFFER, R.M., JOHANNSEN, C.J. (1969): Ecological potentials in spectral signature analysis. In: Remote Sensing in ecology, Athens/Georgia, S. 1-16.
- HOLMES, R.A. (1970): Field Spectroscopy 7. Remote Sensing with special Reference to Agriculture and Forestry, Nat. Ac. of Sc., Washington D.C., pp. 198-323.
- HOLZ, R. (1969): The Surveillant Science, Remote Sensing of the Environment, Houghton Mifflin Company, Boston S. 18 ff
- HORLER, D.N.H., BARBER, J. (1980): Effects of heavy metals on the absorbance and reflectance spectra of plants. International Journal of Remote Sensing, 1980, Vol. 1, No. 2, pp. 121-136.
- HORLER, D.N.H., BARBER, J., DARCH, J.P., FERNS, D.C., BARRINGER, A.R. (1983): Approaches to detection of geochemical stress in vegetation. Advanced Space Research, Vol. 3, No. 2, pp. 175-179, Great Britain.
- HOWARD, J.A., WATSON, R.D., HESSIN, T.D. (1971): Spectral reflectance properties of Pinus Ponderosa in relation to copper content of Soil-Malachite Mine, Jefferson County, Colorado. Proc. of the 7th Int. Symp. on Remote Sensing of Environment, Univ. of Michigan, Ann Arbor, Vol. 1, pp. 285-297.
- HUSS, J. (1984): Luftbildmessung und Fernerkundung in der Forstwirtschaft. Herbert Wichmann Verlag Karlsruhe, 406 S.

- JASKOLLA, F. (1975): Untersuchungen zur Unterscheidung von Kalk- und Dolomitgesteinen unter Zuhilfenahme thermaler Infrarotstrahlung (8-14 μ m). Dipl. Arb., Geol. Inst. d. Universität München.
- KADRO, A. (1981): Untersuchungen der spektralen Reflexionseigenschaften verschiedener Vegetationsbestände. Diss. Univ. Freiburg/Breisgau, 215 S.
- KENNEWEG, M., FÖRSTER, B. (1986): Diagnose und Erfassung von Waldschäden auf der Basis von Spektralsignaturen. Interner Bericht zum BMFT-Projekt. Institut für Landschafts- und Freiraumplanung, TU-Berlin.
- KESSLER, A. (1985): Über die kurzwellige Albedo eines Kiefernwaldes. Eine klimatologische Langzeitstudie. Meteorol. Rdsch. 38, S. 82-91.
- KLEMAN, J. (1985): The spectral signatures of a damaged spruce stand measured from a helicopter. Research report No. 58, Dept. of physical geography. University of Stockholm, 61 p.
- KOCH, B., KRITIKOS, G. (1984): Integrative investigation on forest damage detection based on air-borne multispectral scanner data. ESA/EARSel Symposium, Guilford, UK.
- KOCH, B., AMMER, U., KRITIKOS, G. (1984): Untersuchungen zur Beurteilung der Vitalität von Fichten anhand multispektraler Scannerdaten. Sonderd. Forstwiss. Centralbl. 103. Jg., H. 4-5, S. 214-231.
- KOCH, B., HAYDN, R., KAUFMANN, H., KRAUSE-RABE, S. (1986): Monitoring and inventoring of forest damages by use of Landsat TM data. ESA/EARSel Symposium, Lyngby, DK.
- KOCH, W. (1987): Mündliche Mitteilung. Lehrstuhl für Forstbotanik der Universität München.
- KORTÜM, G.v. (1960): Reflexionsspektroskopie. Springer-Verlag.
- KREUTZER, K., BITTERSÖHL, J. (1986): Untersuchungen über die Auswirkungen des sauren Regens und der kompensatorischen Kalkung im Wald. Forstwissenschaftliches Centralblatt, Jahrgang 105, Heft 4.

- KRIEBEL, K.T., QUENZEL, H., SCHOLZE, W. (1976): On the determination of the atmospheric air light as a normally underestimated perturbation signal. *Atmospheric Environment* Vol. 10, pp. 645-653.
- KRIEBEL, K.T. (1978): Average variability of the radiation reflected by vegetated surfaces due to differing irradianations. *Remote Sensing of Environment* 7, pp. 81-83.
- KRITIKOS, G., KÜBLER, D. und DÖRFEL, H.J. (1983): Untersuchung zur Eignung von Spot-Simulationsdaten zur Erfassung von Waldschäden, Interner Bericht DFVLR, Oberpfaffenhofen.
- LEHRSTUHL FÜR BIOPHYSIK, Universität Hannover
- LILJEQUIST, G. und CEHAK, K. (1984): Allgemeine Meteorologie, Kap. 3, Friedr. Vieweg & Sohn, Braunschweig/Wiesbaden
- MASCHNING, E. (1986): Entwicklung des visuellen Gesundheitszustandes im Fichtenaltbestand Höglwald. *Forstwissenschaftliches Centralblatt*, Jahrgang 105, Heft 4.
- MUNSELL Color Charts for Plant Tissues, second edition (1977).
- MURTHA, P.A. (1978): Interpretation of colour infrared aerial photographs for tree damage in Kitimat Valley, Vancouver/B.C.
- MYERS, V.I. (1970): Soil, water and plant relations. *Remote Sensing, Nat. Ac. of Sc., Washinton D.C.*, pp. 253-297.
- PRUSHA (1987): Mündliche Mitteilung. Institut für Mathematik der Universität München.
- RIGGS, G. und RUNNING, S. (1987): Measureing Near Infrared Spectral Reflectance Changes from Water Stressed Conifer Stands with AIS-2. *Proc. of the Third Airborne Imaging Spectroradiometer Workshop, Universität of Montana, Missoula.*
- RIOM, J. (1980): Detection de pins malades dans l'infrarouge thermique (bande 8-14 μ m). *I.S.P. Hamburg 1980, Commission VII.2.*

- ROCK, B.N., DARREL, L.W., VOGELMANN, J.E. (1985): Field and airborne characterization of suspected acid deposition damage in Red Spruce (*Picea Rubens*) from Vermont. Proceedings of Machine Processing of Remotely Sensed Data Symposium, 1985.
- RÖHLE, H. (1986): Ertragskundliche Zustandserfassung und Zuwachs des Fichtenaltbestandes im Höglwald vor der experimentellen Behandlung. Forstwissenschaftliches Centralblatt, Jahrgang 105, Heft 4.
- SABINS, F.F. (1978): Remote Sensing. Principles and Interpretation. W.H. Freeman and Company, San Francisco, USA.
- SCHANDA, E. (1976): Remote Sensing for Environmental Sciences. Springer Verlag Berlin-Heidelberg. S. 320 ff.
- SCHLOTE, F.W., TÜCKS, M.T., RAYERMANN, M., LANGENBACH, B., HILLER, B., BUHREN, D. (1987: Clorosen: Bestimmung des Chlorosegrades; Test auf Mangel an Mikronährstoffen; Beteiligung von Schwermetallen an der Entstehung von Clorosen. Aus dem Institut für Biologie II, RWTH Aachen, im Druck.
- SCHMITT, U., LIESE, W., RUETZE, M. (1986): Ultrastrukturelle Veränderungen in grünen Nadeln geschädigter Fichten. Interner Bericht am Institut für Holzbiologie und Holzschutz der Bundesforschungsanstalt für Forst- und Holzwirtschaft und Ordinariat für Holzbiologie der Universität Hamburg.
- SCHWALLER, M.R., SCHNETZLER, C.C. (1983): The changes in leaf reflectance of sugar maple (*Acer saccharum* marsh) seedlings in response to heavy metal stress. International Journal of Remote Sensing, 1983, Vol. 4, No. 1, pp. 93-100.
- STRASBURGER (1978): Lehrbuch der Botanik. Gustav Fischer Verlag, Stuttgart.
- TEILLET, P.M., LECKIE, D.G., OSTAFF, D., FEDOSEJEVS, G., AHERN, F.J. (1985): Spectral measurements of tree defoliation. ESA/EARSeL Symposium, Les Arcs, France, Dec. 1985.

THOMAS, J.R., MYERS, V.I., HEILMAN, M.D., WIEGAND, C.L. (1966): Factors effecting light reflectance of cotton. Proc. of the 4th Int. Symp. on Remote Sensing of Environment, Univ. of Michigan, Ann Arbor, pp. 305-312.

TUCKER, C.J. (1980): Remote sensing of leaf water content in the near infrared. Remote Sensing of Environment 10, pp. 23-32.

YOST, E., WENDEROTH, S. (1971): The reflectance of mineralized trees. Proc. of the 7th Int. Symp. on Remote Sensing of Environment, Univ. of Michigan, Ann Arbor, pp. 169-289.

VERZEICHNIS DER ABBILDUNGEN

- Abb. 1: Emissionskurven von Objekten mit unterschiedlicher Oberflächen-temperatur (aus SABINS 1978)
- Abb. 2a: Das elektromagnetische Spektrum (aus SABINS 1978)
- b: Die atmosphärischen Fenster verteilt über den Wellenlängenbereich $0,35\mu\text{m}$ - $14\mu\text{m}$ (aus SABINS 1978)
- Abb. 3: Reflexionsgeometrie (nach KRIEBEL 1976)
- Abb. 4: Definition der Meßrichtung (nach KADRO 1980)
- Abb. 5: Typischer Kurvenverlauf für die Reflexion, Absorption und Transmission grüner Blattorgane im Wellenlängenbereich $0,4\mu\text{m}$ - $4,0\mu\text{m}$ (nach GATES 1970)
- Abb. 6: Reflexionskurven grüner Blattorgane mit den Haupteinflußfaktoren (HOFFER und JOHANNSEN 1968)
- Abb. 7: Reflexion chlorotischer Fichtennadeln im Vergleich zu grünen Fichtennadeln im sichtbaren Wellenlängenbereich (nach ELLING und KNOPPIK 1986)
- Abb. 8: Spektraleigenschaften von behaarten und unbehaarten Huflattichblättern (*Tussilago farfara*) (nach ELLER 1979)
- Abb. 9: Querschnitt durch ein Laubblatt mit möglichen Lichtwegen (nach GATES 1970)
- Abb. 10: Reflexion im nahen Infrarot für unterschiedlich dicke Lagen übereinandergeschichteter Baumwollenblätter (*Gossypium hirsutum*) (nach MYERS 1970)
- Abb. 11: Reflexionskurven unterschiedlich alter Baumwollblätter (*Gossypium hirsutum*) (nach GAUSMAN et al. 1970)
- Abb. 12: Reflexionseigenschaften von Schatten- und Sonnenblättern der Rotbuche (*Fagus silvatica*) (nach ELLER et al. 1981)
- Abb. 13: Querschnitt durch ein Laubblatt von *Fagus silvatica*
- A Sonnenblatt
B Blatt mit mittlerem Lichtgenuß
C Schattenblatt
- (aus STRASBURGER 1978)
- Abb. 14: Reflexion und Transmission von Baumwollpflanzen, die unter verschiedenen Feuchtigkeitsbedingungen aufwuchsen (nach MYERS 1970)
- Abb. 15: Reflexionskurven für Blätter mit unterschiedlichem Wassergehalt (nach TUCKER 1980)
- Abb. 16: Reflexionskurven für Blätter mit unterschiedlicher Stickstoffversorgung (nach MYERS 1970)

- Abb. 17: Veränderung der Reflexionsintensität durch Schwermetallbelastung
(nach SCHWALLER et al. 1983)
- Abb. 18: Mittlerer Tagesgang der Albedo (%) des Hartheimer Kiefernwaldes
für die Jahre 1974 - 1982
- Abb. 19: Anteil des Luftlichtes in % der Gesamtstrahlung für 20° und 60°
Sonnenelevation bei 0° Reflexionszenitwinkel
- Abb. 20: Reflexionswerte eines fixierten Meßausschnittes in zwei Wellen-
längen. Das Datenrauschen wird verursacht durch Windbewegungen
der Blätter, das Absacken der Meßwerte durch auftretende Bewöl-
kung (nach HOLMES 1970)
- Abb. 21: Signaturkurven aus Flugzeugscanneraufnahmen über stark entnadelten
und gesunden Fichten (*Picea abies*) (nach KOCH et al. 1984)
- Abb. 22: Reflexionskurven von *Picea balsamea* mit unterschiedlichem Ent-
nadelungsgrad (nach TEILLET et al. 1985)
- Abb. 23: Reflexionskurven von Fichtenjungbeständen gemessen in Mitlicht-
richtung (nach KADRO 1981)
a) Fichtenstangenholz
b) Fichtendickung
- Abb. 24: Reflexionskurven von Fichtenjungbeständen gemessen in Gegenlicht-
richtung (nach KADRO 1981)
a) Fichtenstangenholz
b) Fichtendickung
- Abb. 25: Reflexionskurven eines Fichtenjungbestandes gemessen quer zur Ein-
strahlungsrichtung (nach KADRO 1981)
- Abb. 26: Blockschaltbild der Gerätefiguration
- Abb. 27: Geländeausrüstung mit ausgefahrener Drehleiter
- Abb. 28: Photometerkugel
- Abb. 29: Schema des Meßkopfes
- Abb. 30: Längsschnitt durch den Meßkopf
a) Seitenansicht
b) Vorderansicht
- Abb. 31: Strahlengangschema im Spektroradiometer
- Abb. 32: Spektroradiometer mit ausgeklappter Referenzscheibe, Videokamera
und Schwenkneigekopf
- Abb. 33: Reflexionskurven gemessen gegen die mit Standardfarbe (Kodak
reflectance paint) beschichtete Innenseite der Photometerkugel
über einen Zeitraum von 48 Stunden

- Abb. 34: Gemittelter Meßausschnitt für die beiden Eingangsoptiken auf dem Monitor
- Abb. 35: Reflexion (nicht verrechnet mit der Einstrahlung) für die Öffnungswinkel 5°, 10°, 15° und 20° gemessen unter Standardbedingungen
- Abb. 36: Reflexionsunterschiede zwischen den Öffnungswinkeln nach Verrechnung mit dem Referenzwert (Meßobjekt grüne Standardflächen)
- Abb. 37: Reflexionskurven gemessen bei unterschiedlichen Lufttemperaturen
- Abb. 38: Reflexionskurven gemessen bei unterschiedlicher Luftfeuchtigkeit
- Abb. 39: Meßkonstellationen für die Untersuchungen zur Azimutwinkelabhängigkeit der Reflexion von Fichten
- Abb. 40: Reflexionskurven, gemessen über Fichte mit 0° Meßzenitwinkel bei Veränderung des Sonnenazimutwinkels von -31° bis 30° und des Sonnenzenitwinkels von 34° bis 38°.
- Abb. 41: Schema zur Besonnung einer kegelförmigen Fichtenkrone im Tagesgang
- Abb. 42: Reflexionskurven gemessen über Fichte im Tagesablauf
- Abb. 43: Reflexionskurven über Fichte, gemessen mit 45° Meßzenitwinkel, bei Veränderungen des Sonnenazimutwinkels von -78° bis -7° und des Sonnenzenitwinkels von 57° bis 31°
- Abb. 44: Reflexionskurven, gemessen bei 3/10 Bewölkung und direkt einfallendem Sonnenlicht und 3/10 Bewölkung und diffus einfallendem Sonnenlicht bei gleicher Meßsystemanordnung
- Abb. 45: Blick in die geschlossene Photometerkugel mit Pflanze und untergelegtem schwarzem Meßtuch
- Abb. 46: Meßteller mit ausgelegten Fichtenzweigproben
- Abb. 47: Reflexion eines Eichenblattes in verschiedenen phänologischen Entwicklungsstadien (nach GATES 1970)
- Abb. 48: Reflexion von Eucalyptusblättern (*Eucalyptus gonicalyx*) mit unterschiedlicher Pigmentierung (nach HOWARD 1971)
- Abb. 49: Reflexion von Fichtennadeln (*Picea rubens*) gesunder und kranker Bäume (nach ROCK et al. 1985)
- Abb. 50: a) Reflexionskurven verschiedener Arten von Laubblättern (Oberseite)
b) Reflexionskurven von Tanne (*Abies alba*) und Douglasie (*Pseudotsuga menziesii*) (Oberseite)
- Abb. 51: Versuchsfläche Ebersberger Forst vom Stahlurm aus aufgenommen
- Abb. 52: Lageplan und Behandlungsvarianten der Versuchspartzellen Höglwald (nach KREUTZER et al. 1986)

- Abb. 53: Fichtenaltbestand im Höglwald (Blick auf Parzelle A1)
- Abb. 54: Versuchsfläche im Fichtenjungbestand des Höglwalds
- Abb. 55: Die für Reflexionsmessungen ausgewählten Buchen (*Fagus silvatica*); Oktober 1987
- Abb. 56: Versuchsfläche Untere Isarauen
- Abb. 57: Buschig wirkendes Fichtenbäumchen in der Photometerkugel vor hellem und dunklem Untergrund
- Abb. 58: Versuchsbaumchen vor, während und nach der Entastung
- Abb. 59: Unterschiedlich stark entnadelte Kiefern
- Abb. 60: Farbstufen nach "MUNSELLS COLOR CHARTS" (Farbtabelle) für Pflanzen
- Abb. 61: Stroben (*Pinus strobus*) durch Anbinden an den Stammfuß wieder aufgerichtet
- Abb. 62: Strobenbestand 21 Tage nach Unterbrechung der Wasserzufuhr
- Abb. 63: Versuchsfläche Seeshaupt (Trockenstreßexperiment an Fichten)
- Abb. 64: Reflexion, gemessen über Fichtenbäumchen bei hellem und dunklem Untergrund
- Abb. 65: Normierte Reflexionskurven von buschig und schütter wirkenden Fichtenbäumchen über dunklem Untergrund
- Abb. 66: Veränderung der Reflexionskurven bei stufenweiser Entastung von Fichtenbäumchen - gemessen über dunklem Untergrund
- Abb. 67: Reflexionskurven für Kiefern mit unterschiedlichem Entnadelungsgrad (NV). Messungen durchgeführt bei gleichem Sonnenzenitwinkel
- Abb. 68: Reflexionskurven für Nadelproben von Kiefern mit unterschiedlichem Entnadelungsgrad
- Abb. 69: Reflexion von gesunden Fichten ohne und mit 40 - 50% Schatten im Meßausschnitt der Krone
- Abb. 70: Reflexion von vitalen grünen Fichten mit 10% Schatten im Meßausschnitt im Vergleich zu vergilbten Fichten mit 20% Schatten im Meßausschnitt
- Abb. 71: Reflexion von Buche mit Blattverlust im Vergleich zu Buche ohne Blattverlust, gemittelt über die Vegetationsperiode
- Abb. 72: Reflexion von eingetopften Fichtenbäumchen im Jahresgang

- Abb. 73: Reflexion von Fichten im Jahresgang gemessen bei gleicher Tageszeit
- Abb. 74: Reflexion von Fichten im Jahresgang gemessen bei gleicher Tageszeit und mit 45° MZW
- Abb. 75: Reflexion von Fichten im Jahresgang gemessen bei gleichem Sonnenzenitwinkel
- Abb. 76: Reflexion von Fichten im Jahresgang gemessen bei gleichem Sonnenzenitwinkel und mit 45° MZW
- Abb. 77: Reflexion von Buche im Jahresgang gemessen bei gleichem Sonnenzenitwinkel
- Abb. 78: Reflexionskurven grüner bis gelber Laubblätter (*Carpinus betulus*), gemessen mit dem Perkin-Elmer Laborspektorradiometer
- Abb. 79: Reflexion gelber bis brauner Laubblätter (*Tilia cordata*) im Vergleich zu grünen Laubblättern, gemessen mit dem Perkin-Elmer Laborspektorradiometer
- Abb. 80: Reflexionskurven grüner bis gelb-brauner Kiefernadeln gemessen in der Photometerkugel mit dem Feldspektorradiometer
- Abb. 81: Reflexionskurven grüner bis gelber Fichtennadeln gemessen in der Photometerkugel mit dem Feldspektorradiometer
- Abb. 82: Reflexion von grünen und gelben Fichten im Frühjahr (Gelände)
- Abb. 83: Reflexion von grünen und gelben Fichten gemessen im Frühsommer (Gelände)
- Abb. 84: Reflexion von grünen und ehemals vergilbten Fichten gemessen im Spätsommer (Gelände)
- Abb. 85: Reflexionskurven von Fichtenbäumchen (4j) gemessen vor, während und nach 48 Std. Trockenstreß
- Abb. 86: Fichtenbäumchen vor und nach 48 Std. Trockenstreß
- Abb. 87: Veränderung der Reflexion von Fichtenbäumchen (4j) während eines 25-tägigen Trockenstreßversuchs
- Abb. 88a: Veränderung der Reflexion von Fichtennadeln bei Trockenstreß
88b: Veränderung der Reflexion von Fichtenzweigen bei Trockenstreß
- Abb. 89a: Reflexion für Stoben (*Pinus strobus*) bei Trockenstreß (Gelände)
89b: Reflexion für Fichten bei Trockenstreß (Gelände)
- Abb. 90a: Reflexion von einjährigen und dreijährigen Nadeln von jungen Fichten
90b: Reflexion von einjährigen und dreijährigen Nadeln von alten Fichten
- Abb. 91: Reflexion einjähriger und dreijähriger Nadeln von Altfichten im Vergleich zu Jungfichten

Abb. 92: Reflexion junger und alter Fichten

Abb. 93: Reflexionskurven von beschatteten und beschienenen Kronenbereichen eines Fichtenbestandes; aufgenommen auf der Basis von Flugzeugscannerdaten (nach KOCH et al. 1985)

Abb. 94a: Reflexion von Kiefern mit unterschiedlichem Nadelverlust (NV) bei abweichendem Sonnenzenitwinkel

94b: Reflexion von Kiefern mit unterschiedlichen Nadelverlust (NV) bei gleichem Sonnenzenitwinkel

VERZEICHNIS DER TABELLEN

- Tab. 1: Absorptionsbanden der Pigmente (aus HUSS 1984)
- Tab. 2: Veränderungen des Anteils an Interzellularräumen mit zunehmendem Blattalter (nach GAUSMAN et al. 1970)
- Tab. 3: Fensterbreiten für die Kanäle im Sichtbaren, im nahen Infrarot und im kurzwelligen Infrarot (nach ERNST 1987)
- Tab. 4: Meßausschnittsgröße, Überdeckungsgrad und Verlustfläche für die häufigsten Meßdistanzen bei einem Öffnungswinkel von 15°
- Tab. 5: Einfluß verschiedener Öffnungswinkel auf den gegen die weiße Kodakreferenzscheibe gemessenen Reflexionswert (normiert auf den Öffnungswinkel 20°)
- Tab. 6: Technische Spezifikation des Perkin-Elmer Laborspektorradiometers
- Tab. 7: Bestandesbeschreibung der Ebersberger Forst
- Tab. 8: Bestandesbeschreibung des Fichtenaltbestandes im Höglwald
- Tab. 9: Bestandesbeschreibung des Fichtenjungbestandes im Höglwald
- Tab. 10: Bestandesbeschreibung der Versuchsfläche Untere Isarauen
- Tab. 11: Bestandesbeschreibung der Stobenversuchsflächen
- Tab. 12: Bestandesbeschreibung der Wasserstreßfläche Seeshaupt
- Tab. 13: Quotienten zur Reflexionsveränderung bei zunehmendem Verlust an grüner Astmasse
- Tab. 14: Quotienten zur Reflexionsveränderung bei Kiefern mit zunehmendem Nadelverlust
- Tab. 15: Quotienten für die Reflexion von gesunden Fichten ohne Schatten und mit 40 - 50% Schatten im Meßausschnitt der Krone
- Tab. 16: Quotienten für die Reflexion vitaler grüner Fichten mit 10% Schatten im Meßausschnitt und vergilbter Fichten mit 20% Schatten im Meßausschnitt
- Tab. 17: Quotient für die Reflexion von Buche mit und ohne Blattverlust
- Tab. 18: Quotienten zur Reflexion von Fichte im Jahresgang anhand von Laboruntersuchungen
- Tab. 19: Quotienten zur Reflexion von Fichte im Jahresgang bei gleicher Tageszeit: 12.00 Uhr bis 13.30 Uhr MEZ
- Tab. 20: Quotienten zur Reflexion von Fichten im Jahresgang gemessen bei gleicher Tageszeit und 45° MZW
- Tab. 21: Quotienten zur Reflexion von Fichte im Jahresgang gemessen bei gleichem Sonnenzenitwinkel

- Tab. 22: Quotienten zur Reflexion von Fichten im Jahresgang gemessen bei gleichem Sonnenzenitwinkel und mit 45° MZW
- Tab. 23: Quotienten zur Reflexion von Buche im Jahresgang
- Tab. 24: Quotienten zur Reflexion vergilbter Kiefernadeln
- Tab. 25: Quotienten zur Reflexion grüner und vergilbter Fichtennadeln
- Tab. 26: Quotienten zur Reflexion grüner und vergilbter Fichten im Verlauf der Vegetationsperiode
- Tab. 27: Mittleres osmotisches Potential der Kontroll- und Streßbäumchen vor Beginn des Trockenstreßversuchs, nach 22 Std. und nach 48 Std. Versuchszeit
- Tab. 28: Quotienten zur Reflexion von Fichtenbäumchen bei Trockenstreß
- Tab. 29: Quotienten zur Reflexion von Fichtenzweigen und -adeln bei Trockenstreß
- Tab. 30: Veränderung des Wasserpotentials der Stoben (Pinus strobus) bei Trockenstreß (nach RIGGS et al. 1987)
- Tab. 31: Quotienten zur Reflexion von einjährigen und dreijährigen Fichtennadeln junger (18j.) und alter (85j.) Bäume
- Tab. 32: Quotienten zur Reflexion von Jung- und Altfichten
- Tab. 33: Veränderung des angenommenen Reflexionsgrads (R) (bei unendlicher Schichtdicke) in Abhängigkeit von der Reflexion des Untergrundes und des Streuvermögens des Objektes (nach KORTUM 1960 und ERNST 1987)

VERZEICHNIS DER VERWENDETEN SYMBOLE

ABS	: Absorption
AIS	: Airborne Imaging Spectrometer
AV	: Verlust an grüner Astmasse
Az	: Sonnenazimut
BGR	: Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe
BV	: Blattverlust
c	: Lichtgeschwindigkeit
Ca	: Geschwindigkeit in der Luft
Cs	: Geschwindigkeit in der Substanz
dA	: Flächenelement eines reflektierenden Körpers
DFVLR	: Deutsche Forschungs- und Versuchsanstalt für Luft- und Raumfahrt
E	: Ausstrahlung (W/m^2)
E	: Bestrahlungsstärke
EBE	: Ebersberg
GL	: Glättung der Kurven
GSF	: Gesellschaft für Strahlen- und Umweltforschung
HWA	: Höglwaldaltbestand
HWJ	: Höglwaldjungbestand
ISA	: Isarauen
JPL	: Jet Propulsion Laboratories
LAI	: Leaf Area Index (Verhältnis aller Blattoberflächen eines Baumes zu dessen vertikaler Projektionsfläche am Boden)
$L_{\lambda i}$	: Einfallende spektrale Strahldichte
$L_{\lambda r}$	: Reflektierte spektrale Strahldichte
lx	: Lux
MEZ	: Mitteleuropäische Zeit
Mr	: spezifische Ausstrahlung
MZW	: Meßzenitwinkel
n	: Brechungsindex
NIR	: Near Infrared (Nahes Infrarot) $0,7 \mu m - 1,1 \mu m$
Norm	: Normierung der Kurven
NV	: Nadelverlust
PbS	: Bleisulfid
REF	: Reflexion
$R(\lambda)$	: Reflexionsfaktor
R_B	: Kiefer über einer weißen Platte

R_N : Kiefer über einer schwarzen Platte
 R_S : Kiefer über Grasboden
 Si : Silizium
 SWIR: Short Wave Infrared (Kurzweiliges Infrarot) $1,1 \mu m - 3,0 \mu m$
 SZW : Sonnenzenitwinkel
 T_O : Oberflächentemperaturen in K
 TRN : Transmission
 VIS : Visible (Sichtbarer Lichtbereich) $0,4 \mu m - 0,7 \mu m$
 wL : weißer Lambert-Reflektor

 $\Delta \gamma$: Azimutdifferenz
 ϵ : Emission im hier relevanten Wellenlängenbereich
 $\mathcal{Z}$: Zenitwinkel
 $\mathcal{Z}_i$: Einfallszenitwinkel
 $\mathcal{Z}_r$: Reflexionszenitwinkel
 λ : Wellenlänge
 ν : Frequenz
 Π : Osmotisches Potential
 ρ : Reflexionsgrad
 ρ_d : diffuse Reflexion
 ρ_r : spiegelnde Reflexion
 σ : Stefan-Boltzmann Konstante $(=5.67 \times 10^{-8} \text{ Wm}^{-2} \text{ K}^{-4})$
 γ : Azimutwinkel
 γ_i : Einfallssazimutwinkel
 γ_r : Reflexionsazimutwinkel
 ϕ_i : einfallender Strahlungsfluß
 ϕ_r : reflektierter Strahlungsfluß
 Ω_r : Raumwinkel

ANHANG

Kurve Nr.	550nm - 660nm		920nm - 1000nm	
	Minimum	Maximum	Minimum	Maximum
1 0 % AV	660nm	570nm	1000nm	920nm
2 33 % AV	660nm	570nm	1000nm	940nm
3 40 % AV	660nm	570nm	1000nm	920nm
4 74 % AV	660nm	570nm	980nm	960nm
5 78 % AV	660nm	570nm	920nm	1000nm
6 91 % AV	660nm	570nm	920nm	1000nm

Tab. A 1: Reflexionsminima und -maxima bei zunehmendem Verlust an grüner Astmasse (AV)

Kurve Nr.	550nm - 660nm		920nm - 1000nm	
	Minimum	Maximum	Minimum	Maximum
1 (0-20% NV)	660nm	570nm	920nm	1000nm
2 (40-50% NV)	660nm	570nm	920nm	1000nm
3 (70-80% NV)	660nm	570nm	920nm	1000nm

Tab. A 2: Reflexionsminima und -maxima bei Kiefern mit zunehmendem Nadelverlust (NV)

Kurve Nr.	550nm - 660nm		920nm - 1000nm	
	Minimum	Maximum	Minimum	Maximum
1 (0-20% NV)	660nm	570nm	980nm	1000nm
2 (40-60% NV)	660nm	570nm	980nm	1000nm
3 (70-90% NV)	660nm	570nm	980nm	1000nm

Tab. A 3: Reflexionsminima und -maxima der Nadeln von unterschiedlich stark geschädigten Kiefern

Kurve Nr.		550nm - 660nm		920nm - 1000nm	
		Minimum	Maximum	Minimum	Maximum
1	40-50% Schatten	660nm	570nm	1000nm	940nm
2	0 % Schatten	660nm	570nm	1000nm	940nm

Tab. A 4: Reflexionsminima und -maxima bei unterschiedlichen Schattenanteilen im Meßausschnitt am Beispiel der Fichte

Kurve Nr.		550nm - 660nm		920nm - 1000nm	
		Minimum	Maximum	Minimum	Maximum
1	20 % Schatten	670nm	580nm	970nm	900nm
2	10 % Schatten	660nm	570nm	980nm	900nm

Tab. A 5: Reflexionsminima und -maxima bei grünen Fichten mit 10% Schatten im Meßausschnitt im Vergleich zu vergilbten Fichten mit 20% Schatten im Meßausschnitt

Kurve Nr.	550nm - 660nm		920nm - 1000nm	
	Minimum	Maximum	Minimum	Maximum
1 0 % BV	660nm	570nm	980nm	1000nm
2 25 % BV	660nm	570nm	920nm	1000nm

Tab. A 6: Reflexionsminima und -maxima für Buchen mit 0% und 25% Blattverlust (BV)

Kurve Nr.	550nm - 660nm		920nm - 1000nm	
	Minimum	Maximum	Minimum	Maximum
1 10.04.87	660nm	560nm	980nm	920nm
2 27.04.87	660nm	560nm	980nm	920nm
3 21.05.87	660nm	560nm	1000nm	920nm
4 29.07.87	660nm	570nm	1000nm	920nm
5 22.09.87	660nm	570nm	1000nm	920nm

Tab. A 7: Reflexionsminima und -maxima für eingetopfte Fichtenbäumchen im Jahresgang

Kurve Nr.	550nm - 660nm		920nm - 1000nm	
	Minimum	Maximum	Minimum	Maximum
1 Frühjahr	660nm	570nm	960nm	1000nm
2 Sommer	660nm	570nm	1000nm	920nm
3 Spätsommer	660nm	570nm	1000nm	920nm

Tab. A 8: Reflexionsminima und -maxima für Fichte im Jahresgang

Kurve Nr.	550nm - 660nm		920nm - 1000nm	
	Minimum	Maximum	Minimum	Maximum
1 Mai	660nm	570nm	1000nm	920nm
2 Juli	660nm	570nm	980nm	920nm
3 August	660nm	570nm	980nm	920nm

Tab. A 9: Reflexionsminima und -maxima für Buche im Jahresgang

Kurve Nr.	550nm - 660nm		920nm - 1000nm	
	Minimum	Maximum	Minimum	Maximum
1 grün	660nm	560nm	1000nm	920nm
2 <u>grün</u> /gelb	660nm	560nm	1000nm	920nm
3 <u>gelb</u> /grün	660nm	570nm	980nm	920nm
4 <u>gelb</u> /braun	660nm	650nm	920nm	1000nm

Tab. A 10: Reflexionsminima und -maxima bei zunehmender Vergilbung von Kiefernnadeln

Kurve Nr.	550nm - 660nm		920nm - 1000nm	
	Minimum	Maximum	Minimum	Maximum
1 gelb	660nm	580nm	980nm	920nm
2 <u>grün</u> /gelb	660nm	570nm	1000nm	920nm
3 grün	660nm	560nm	1000nm	920nm
4 intensiv grün	660nm	560nm	1000nm	920nm

Tab. A 11: Reflexionsminima und -maxima bei zunehmender Vergilbung von Fichtennadeln

Kurve Nr.	550nm - 660nm		920nm - 1000nm	
	Minimum	Maximum	Minimum	Maximum
1 Frühjahr vergilbt	660nm	570nm	980nm	900nm
2 Frühjahr grün	660nm	570nm	980nm	900nm
3 Frühsommer vergilbt	660nm	570nm	980nm	920nm
4 Frühsommer grün	660nm	570nm	1000nm	920nm
5 Spätsommer vergilbt	660nm	570nm	1000nm	960nm
6 Spätsommer grün	660nm	570nm	1000nm	920nm

Tab. A 12: Reflexionsminima und -maxima für vergilbte und grüne Fichten im Verlauf der Vegetationsperiode

Kurve Nr.	550nm - 660nm		920nm - 1000nm	
	Minimum	Maximum	Minimum	Maximum
1 7.1./17.22h	660nm	570nm	1000nm	940nm
2 8.1./16.04h	660nm	570nm	1000nm	940nm
3 8.1./ 2.14h	660nm	570nm	1000nm	940nm
4 9.1./ 4.00h	660nm	570nm	1000nm	940nm
5 9.1./11.02h	660nm	570nm	1000nm	940nm
6 9.1./16.49h	660nm	570nm	1000nm	940nm

Tab. A 13: Reflexionsminima und -maxima für Fichtenbäumchen mit 48 Std. Trockenstreß

Kurve Nr.	550nm - 660nm		920nm - 1000nm	
	Minimum	Maximum	Minimum	Maximum
1 15.05.87	660nm	560nm	920nm	1000nm
2 21.05.87	660nm	560nm	920nm	1000nm
3 25.05.87	660nm	560nm	920nm	1000nm
4 09.06.87	660nm	560nm	920nm	1000nm

Tab. A 14: Reflexionsminima und -maxima für Fichtenbäumchen im Verlauf von 24 Tagen Trockenstreß

Kurve Nr.	550nm - 660nm				920nm - 1000nm			
	Minimum		Maximum		Minimum		Maximum	
	Nadeln	Zweige	Nadeln	Zweige	Nadeln	Zweige	Nadeln	Zweige
1 7.10.	660nm	660nm	570nm	570nm	1000nm	1000nm	920nm	920nm
2 14./16.10.	660nm	660nm	570nm	570nm	920nm	1000nm	1000nm	920nm
3 22./26.10.	660nm	660nm	580nm	580nm	920nm	920nm	1000nm	1000nm
4 10.11.	660nm	550nm	580nm	590nm	920nm	920nm	1000nm	1000nm

Tab. A 15: Reflexionsminima und -maxima für Fichtennadeln und -zweigen bei zunehmendem Trockenstreß

Kurve Nr.	550nm - 660nm				920nm - 1000nm			
	Minima		Maxima		Minima		Maxima	
	HWJ*	HWA*	HWJ	HWA	HWJ	HWA	HWJ	HWA
1 einjährig	660nm	660nm	570nm	570nm	980nm	980nm	920nm	920nm
2 dreijährig	660nm	660nm	570nm	570nm	980nm	980nm	920nm	920nm

* HWJ: Höglwaldaltbestand

** HWA: Höglwaldjungbestand

Tab. A 16: Reflexionsminima und -maxima für einjährige und dreijährige Nadeln von jungen Fichten im Vergleich zu alten Fichten

Kurve Nr.		550nm - 660nm		920nm - 1000nm	
		Minimum	Maximum	Minimum	Maximum
1	Altfichten	660nm	570nm	980nm	940nm
2	Jungfichten	660nm	570nm	980nm	920nm
3					
4					
5					
6					

Tab. A 17: Reflexionsminima und -maxima für Jungfichten und Altfichten

München, den 30.11.1987

LEBENS LAUF

Name:	Koch, geb. Wimmer
Vornamen:	Barbara, Gertrud, Berta
Geburtsdatum:	12. Juni 1957
Geburtsort:	Landshut
Staatsangehörigkeit:	Deutsche
Religion:	röm.-kath.
Familienstand:	verheiratet, 1 Kind
Schulbildung:	1964 - 1970 Volksschule, Landshut 1970 - 1974 Realschule, Landshut und Kempten 1974 - 1975 Highschool, Santa Barbara 1975 - 1977 Allgäu Gymnasium, Kempten 1977 Abitur
Hochschulbildung:	1977 - 1982 Studium an der forst- wissenschaftlichen Fakultät der Universität, München. 1980 Vordiplom 1982 Hauptdiplom
Berufliche Tätigkeit:	Seit 1982 am Lehrstuhl für Landschaftstechnik der Universität München als wissenschaftliche Mit- arbeiterin tätig. Besondere Kennt- nisse auf dem Gebiet der Fernerkun- dung und Bildauswertung erworben.
Sprachkenntnisse:	Englisch (9 Jahre) Französisch (3 Jahre)
Führerschein:	Klasse III

